46

DER PRAKTISCHE FUNKAMATEUR



Otto Morgenroth

Funktechnische Bauelemente

Teil III:

Elektronen- und Spannungsstabilisatorröhren u. a.

Der praktische Funkamateur • Band 46

Funktechnische Bauelemente III

Aufbau, Eigenschaften, Wirkungsweise, technische Daten

OTTO MORGENROTH

Funktechnische Bauelemente

Aufbau, Eigenschaften,
Wirkungsweise, technische Daten

Teil III:

Elektronenröhren,
Spannungs-Stabilisatorröhren,
Quarze,
Thermoelemente und Thermo-
umformer,
Gerätesicherungen



DEUTSCHER MILITÄRVERLAG

Redaktionsschluß: 15. Februar 1964

1.—20. Tausend
Deutscher Militärverlag, Berlin 1964
Lizenz-Nr. 5
Zeichnungen: Hildegard Seidler
Lektor: Wolfgang Stammler
Vorauskorrektor: Hans Braitinger
Hersteller: Günter Hennersdorf
Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme, Potsdam
EVP: 1,90 DM

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT

Entwurf und Konstruktion eines funktechnischen Gerätes setzen umfangreiche und genaue Kenntnisse der Bauelemente voraus, da von ihrem richtigen Einsatz die Funktion des Empfängers, Senders, Meßgerätes oder der elektronischen Schaltung in hohem Maße mitbestimmt wird.
Mit den im vorliegenden Band III besprochenen Bauelementen sind sämtliche in der Rundfunk-, Amateur- und kommerziellen Technik gebräuchlichen Bauelemente erfaßt.
Da es keine funktechnische Schaltung gibt, in der nicht mindestens *eine* Elektronenröhre vorhanden ist (außer in volltransistorisierten Geräten), wird dieses Bauelement besonders eingehend behandelt. Die Spannungs-Stabilisatorröhre wendet man weniger an. Dem Amateur leistet sie aber gute Dienste, denn eine optimale Konstanz des Amateursupers, Senders oder Frequenzmessers ist ohne Spannungsstabilisierung kaum gewährleistet. Bei der Besprechung der Quarze wird auf die Physik und Technologie dieses Bauelementes nicht eingegangen, da sie im Band 24 der Reihe „Der praktische Funkamateur" besprochen wurden. Auch im Amateurbetrieb ist die Messung hochfrequenter Ströme oder Leistungen wichtig. Deshalb werden auch die Thermoelemente und Thermoumformer in diesem Heft behandelt. Der auf Grund langjähriger praktischer Erfahrung entstandene Band soll eine Hilfe beim Entwurf von Schaltungen sein und das technische Wissen vervollkommnen. Somit wird die Broschüre nicht nur dem Funkamateur von Nutzen sein, sondern auch dem Angehörigen der Funkeinheiten unserer Nationalen Volksarmee, den Klubs „Junger Techniker" und den Bastelgemeinschaften, dem Funkmechaniker, dem Schüler der Polytechnischen Oberschule und dem an der Funktechnik interessierten Laien viele Anregungen geben.

Der Verfasser dankt den Betrieben

VEB Funkwerk Erfurt

VEB Funkwerk Neuhaus a. R.

VEB Werk für Fernsehelektronik, Berlin-Oberschöneweide

Deutsche Glimmlampengesellschaft, Leipzig

VEB Elektro-Apparate-Werke, Berlin-Treptow

VEB Rafena-Werke, Radeberg

für die Überlassung von Bildvorlagen, Dokumentationen und Prospektmaterial, sowie Herrn Cuno Triebel, Sonneberg, für die Herstellung von Fotos.

Sonneberg, 1. Juli 1963 Der Verfasser

EINLEITUNG

Die Bauelemente werden nach einem einheitlichen Schema besprochen. Der Begriffsbestimmung folgt ein allgemeiner Überblick über Entwicklung, grundsätzliche Bauform, Eigenschaften und Wirkungsweise. Sodann werden die speziellen mechanischen und elektrischen Eigenschaften der verschiedenen Arten, Typen und Ausführungen behandelt und Angaben über Typisierung, Kennzeichnung, technische Daten und Anwendung gemacht. Auf die Schaltungstechnik der Elektronenröhre wird nicht eingegangen, da diese bereits in Band 13 der Reihe „Der praktische Funkamateur" beschrieben wurde.

1. Elektronenröhren

Die Elektronenröhre ist ein wichtiges Bauelement der Funk-, Fernseh- und Nachrichtentechnik, auf dem Gebiet der Elektronik, der Regeltechnik u. a. m. Damit die Röhre die gestellten Aufgaben erfüllen kann, wird höchste Präzision der einzelnen Bauteile und ihres Aufbaues sowie eine unbedingte Gleichmäßigkeit der zahlreiche Typen und Formen umfassenden Fertigung gefordert.

Das Kennzeichen der Elektronenröhre ist eine in einem Vakuum stattfindende Elektronenbewegung, die durch Glühemission ausgelöst wird.

Grundsätzlich besteht die Elektronenröhre aus einem hochevakuierten, gesockelten oder — bei den modernen Rundfunk-Empfangsröhren — ungesockelten Kolben. Er ist gewöhnlich in Glastechnik, bei Spezialröhren in Metall-Glas-, Metall-Keramik- oder Ganzmetalltechnik ausgeführt.

Im Laufe der Zeit haben sich unterschiedliche Bauformen herausgebildet. Von der Glühlampentechnik ausgehend, wurden die Elektroden der ursprünglichen Röhre senkrecht auf einem „Quetschfuß“ montiert. In diesem sind die Elektrodenzuführungen vakuumdicht eingequetscht. Der mit einem Pumpstutzen versehene Fuß ist mit dem Röhrenkolben verschmolzen. Als Bauteil zum Anschluß der Röhre an die Schaltung dienen angekittete Stift- oder Topfsockel aus Preßstoff.

Eine Weiterentwicklung mit sehr guten Eigenschaften stellt die *Stahlröhre* dar. Bei ihr ist das gedrängt aufgebaute Elektrodensystem waagerecht über einem mit dem angeflanschten Stahlblechkolben vakuumdicht verschweißten Blechteller angeordnet. Durch diesen sind die Anschlußdrähte mittels Glasperleneinschmelzungen herausgeführt. Stahlröhren besitzen einen flachen, mit 8 oder 10 Stiften versehenen Preßstoffsockel. Der Pumpstutzen ist ein Metallröhrchen, das nach Evakuierung des Kolbens verschweißt wird. Die einst weit verbreiteten Stahlröhren werden heute nicht mehr hergestellt.

Neuzeitliche Röhren sind die in Allglastechnik ausgeführten Preßtellerröhren. Bei diesen ist das Elektrodensystem senkrecht über einem Scheibenfuß, dem mit dem Kolbenrand verschmolzenen Preßteller aufgebaut. Die kreisförmig angeordneten, in den Teller eingepreßten Durchführungen dienen unmittelbar als Sockelstifte.
Als Preßtellerröhren sind verschiedene Typenreihen entwickelt worden, so die 8stiftigen *Schlüsselröhren* und die *Rimlockröhren.* Sie stellen die Vorläufer der modernsten Ausführungen der Allglasröhren, der *Noval-* und *Miniaturröhren,* dar. Beide Arten gleichen sich in Herstellungstechnik, Kolbendurchmesser und Anordnung der Stifte. Unterschiedlich ist die Anzahl der

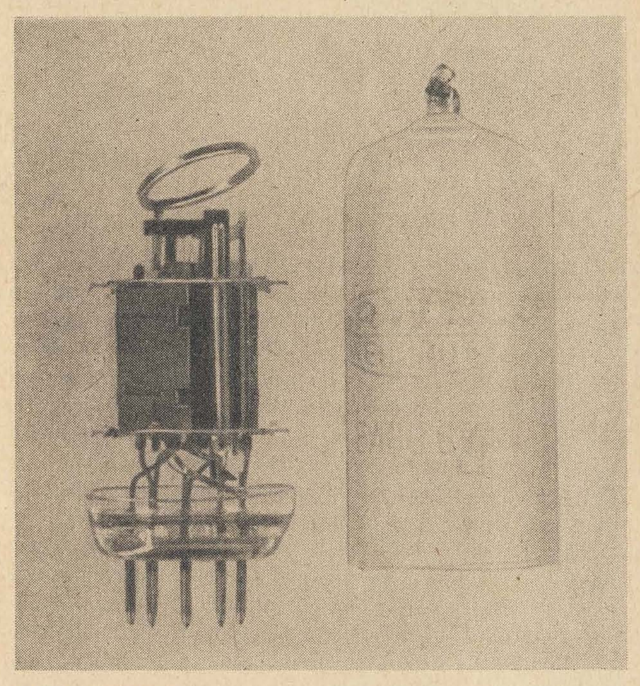


Bild 1 Novalröhre

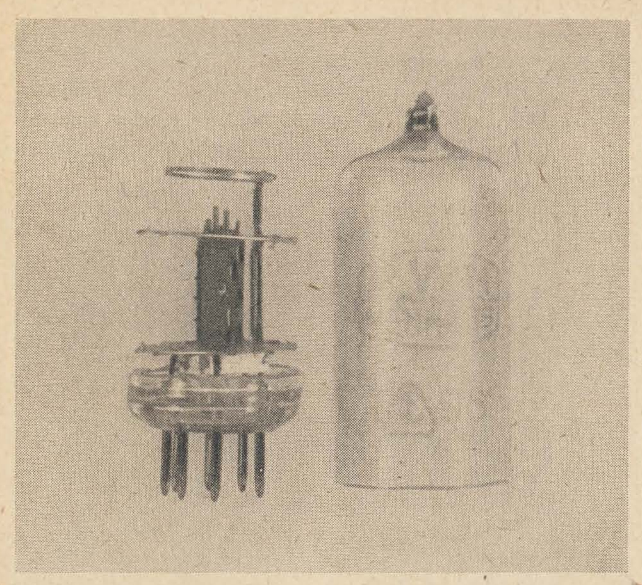


Bild 2 Miniaturröhre

Sockelstifte, die als zugespitzte Drähte vakuumdicht in den Teller eingepreßt sind und mit einer Länge von 7 mm aus diesem herausragen. Die Novalröhre mit einem Durchmesser von 22 mm und einer Höhe von 33 bis 76 mm hat in einem Zehnerteilkreis 9 Stifte auf einem Kreisdurchmesser von 11,9 mm. Bei der Miniaturröhre, die 38 bis 60 mm hoch ist, sind in einem Achterteilkreis 7 Stifte auf einem Kreisdurchmesser von 9,5 mm eingepreßt. Die durch Fortlassen eines Stiftes entstandene Lücke gewährleistet ein richtiges Einsetzen der Röhre in die Fassung.
Die für geringe Leistungen bestimmten *Subminiaturröhren* sind die kleinsten Vertreter der modernen Allglasröhre. Der runde oder ovale Röhrenkolben besitzt einen mittleren Durchmesser von 5 bis 10 mm und eine Höhe von 25 bis 50 mm. Die Durchführungen, 8 bzw. 5 Anschlußdrähte, sind ring- oder reihenförmig im Scheibenfuß eingepreßt. Sie werden meist in

die Schaltung eingelötet; einige Ausführungen mit auf 7 mm gekürzten Drähten sind für Spezialfassungen geeignet.
Die Bilder 1, 2 und 3 zeigen Ausführungen moderner Empfängerröhren. Röhren, die gegenüber normalen Empfängerröhren eine größere Zuverlässigkeit und Lebensdauer haben, bezeichnet man als *Langlebensdauerröhren*. Sie werden dort eingesetzt, wo ein Röhrenwechsel schwierig ist; im allgemeinen verwendet man Langlebensdauerröhren in Weitverkehrsanlagen und in der industriellen Elektronik.

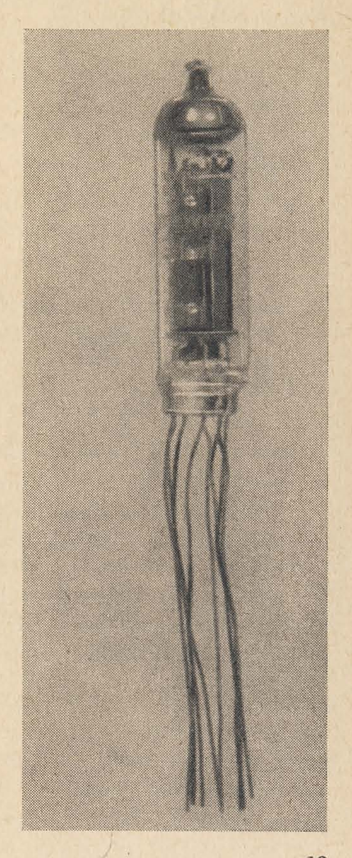


Bild 3
Subminiaturröhre

Das *Elektrodensystem* der Röhre besteht im einfachsten Fall aus der *Katode* und der *Anode*. Zwischen diese können, je nach Verwendungszweck der Röhre, bis zu 7 weitere Elektroden als *Gitter* eingefügt werden. Die Katode ist entweder ein feiner Draht (Heizfaden) oder ein Metallröhrchen, in dem sich der Heizfaden befindet. Die Anode besteht aus einem zylindrischen, um die Katode konzentrisch aufgebauten Nickel- oder Eisenblech oder auch aus einem Drahtgeflecht. Als Gitter verwendet man eine Drahtwendel, die ebenfalls konzentrisch um die Katode gelegt ist (Bild 4).

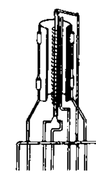


Bild 4
Elektrodensystem einer Triode

In bezug auf die Anzahl der Elektroden und die Art des Systemaufbaues ergibt sich folgende Aufteilung:

Röhren ohne Gitter

Dioden = Zweielektroden-Röhren

Röhren mit einem oder mehreren Gittern

Trioden = Dreielektroden-Röhren
Tetroden = Vierelektroden-Röhren
Pentoden = Fünfelektroden-Röhren
Hexoden = Sechselektroden-Röhren
Heptoden = Siebenelektroden-Röhren
Oktoden = Achtelektroden-Röhren
Enneoden = Neunelektroden-Röhren

Röhren mit zwei Systemen gleicher Art

Duodioden
Doppeltrioden
Doppeltetroden
Doppelpentoden

Röhren mit zwei oder mehreren Systemen verschiedener Art (Verbundröhren)

Diode	—	Duodiode-Triode
Diode	—	Pentode
Duodiode	—	Triode
Duodiode	—	Pentode
Triode	—	Tetrode
Triode	—	Pentode
Triode	—	Hexode
Triode	—	Heptode

Von allen diesen Röhren wird heute ein Teil nicht mehr hergestellt.

Nach der Stromart, mit der die Heizung der Katode erfolgt, sind zu unterscheiden:

Wechselstromröhren (für Parallelheizung),
Allstromröhren (für Serienheizung),
Batterieröhren.

Die *Wirkungsweise* der Elektronenröhre beruht auf dem Austritt freier Elektronen aus dem Molekulargefüge von Metallen in den freien Raum. Dieser Vorgang, als *Elektronenemission* bezeichnet, kann auf verschiedene Weise stattfinden. In bezug auf die Elektronenröhre interessiert die durch Erhitzung einer Elektrode, der Katode, hervorgerufene Glüh- oder thermische Emission. Voraussetzung für den Austritt von Elektronen ist, daß sie eine bestimmte Mindestgeschwindigkeit haben, um die beim Verlassen der Elektrodenoberfläche auftretende, nach innen gerichtete Anziehungskraft überwinden zu können. Diese vom Elektrodenmaterial abhängige Geschwindigkeit ist die „Austrittsgeschwindigkeit"; sie beträgt z. B. bei Wolfram 1260 km/s. An Stelle der Austrittsgeschwindigkeit verwendet man meist die in Volt gemessene „Austrittsarbeit", die mit der Geschwindigkeit verknüpft ist (Wolfram 4,53 V). Da eine merkliche Emission erst oberhalb einer bestimmten Temperatur einsetzt, sind nur wenige Reinmetalle als Katodenmaterial geeignet. Für die Praxis ist nur Wolfram von Bedeutung. Andere Metalle ergeben zwar eine beträchtlich größere Emis-

sion, können jedoch auf Grund des niedrigen Schmelzpunktes nicht unmittelbar als Katodenmaterial verwendet werden. Eine wichtige Voraussetzung für die einwandfreie Funktion der Emission ist das *Vakuum*, da in der Luft mit atmosphärischem Druck die Elektronenbewegung infolge von Zusammenstößen mit den vorhandenen Gasmolekülen (Sauerstoff, Stickstoff u. a.) stark behindert wird. Trotz hoher angelegter Anodenspannung würde kein Strom fließen. Das Röhrensystem muß sich also in einem Vakuum befinden. Ein absolutes Vakuum läßt sich nicht herstellen. Die Gasreste können jedoch so weit entfernt werden, daß der Gasdruck auf etwa 10^{-6} mm Hg (Quecksilbersäule) = 10^{-6} Torr (dies entspricht einem Druck von 10^{-9} Atmosphären) zurückgeht. Eine erforderliche weitere Verbesserung des Vakuums wird durch die Kombination des Pumpverfahrens mit der Methode der Gasaufzehrung erzielt. Dieser als *Getterung* bezeichnete Vorgang beruht auf der Verdampfung eines kleinen Stückes Gettermaterial (Aluminium-Barium-Verbindung), das in einer kleinen Wanne befestigt ist. Dabei wird die evakuierte Röhre in ein starkes hochfrequentes Wechselfeld gebracht. Durch die Erhitzung verdampft das Gettermaterial. Auf der Kolbeninnenseite schlägt sich der Metalldampf nieder und bildet dort einen bräunlich-spiegelnden Belag, den *Getterspiegel*. Er absorbiert die in der Röhre noch vorhandenen Gasreste. Auch während des Betriebes der Röhre werden die etwa aus der Anode austretenden Gasreste vom Getter aufgenommen, so daß die Erhaltung des Röhren-Vakuums über lange Zeit gewährleistet ist. Es gibt auch nicht verdampfende Getter; sie sind als Aufstrich angebracht und binden bei bestimmten Röhrentemperaturen die Restgase. Ein sich flockig-weiß verfärbender Getterniederschlag zeigt an, daß sich das Vakuum verschlechtert hat und die Röhre unbrauchbar geworden ist. Die an der Anode durch Elektronenaufprall hervorgerufene Erwärmung, die beträchtliche Ausmaße annehmen kann, stellt einen Leistungsverlust, die Anodenverlustleistung der Röhre, dar. Um einen möglichst großen Wirkungsgrad der Röhre zu erzielen, muß für eine ausreichende *Wärmeableitung* gesorgt werden. Während bei Senderöhren sehr hoher Leistung eine

Luft- oder Wasserkühlung der Anode notwendig ist, sind Empfangsröhren und kleine Senderöhren strahlungsgekühlt. Bei den strahlungsgekühlten Röhren kann die Wärmeabstrahlung durch eine großflächig ausgeführte Anode, graphitgeschwärztes Anodenblech und Kühlfahnen begünstigt werden. Eine Gittererwärmung wird durch Kühlflügel, die an den Montagestegen befestigt sind, herabgesetzt.
Die in vielen Röhren vorhandenen *Abschirmungen* sind erforderlich, um die Streuelektronen aufzufangen und abzuleiten, da diese die einwandfreie Funktion der Röhre beeinträchtigen können. Streuelektronen sind Elektronen, die nicht zur Anode gelangten, sondern von Isolierteilen und an der Kolbenwandung reflektiert wurden. Zur Abschirmung dienen Bleche, metallische Deckel, Blechmäntel u. a. m.

1.1. Katode und Heizung

Die Katode bestimmt in hohem Maße den konstruktiven Aufbau des Elektrodensystems der Röhre.
Die Entwicklung der Katode bis zu der heute allgemein üblichen *Oxid-Katode* führte über die Wolfram- und Thorium-Katode. Das Kennzeichen der modernen Katode ist eine auf einer Wolfram- oder Nickelunterlage aufgetragene Emissionsschicht aus einem Gemisch von Barium-, Strontium- und Kalziumkarbonat, das während des Fertigungsablaufes durch Erhitzen in seine Oxide umgewandelt wird.
Oxidkatoden-Röhren besitzen ausgezeichnete Betriebseigenschaften und arbeiten sehr wirtschaftlich. Unter Einhaltung der Nennbedingungen haben diese Katoden eine Lebensdauer von einigen 1000 Stunden.
Damit man eine verwertbare Emission erhält, muß die Katode künstlich geheizt werden. Die Heizung kann mit Gleich- oder Wechselstrom, direkt oder indirekt erfolgen.

1.1.1. Die direkt geheizte Katode

Bei direkt geheizten Katoden moderner Elektronenröhren besteht diese Elektrode aus einem verspannten Faden aus

Wolfram oder Nickel von einigen hundertstel Millimeter Dicke. Er ist mit einer Bariumoxidschicht von 10 bis 60 µm Dicke überzogen. Nur diese Schicht ist für die Elektronenemission maßgebend.
Die Heizleistung, das Produkt aus Spannung und Strom, wird so bemessen, daß der Faden die für die Emission erforderliche Temperatur erreicht. Im allgemeinen genügen 700 bis 800 °C (diese entsprechen einer dunklen Rotglut).
Für die Anwendung als Empfängerröhre (nicht Netzgleichrichterröhre) muß die Heizung mit reinem Gleichstrom erfolgen, damit eine Brummeinstreuung über die Katode vermieden wird. Direkt geheizte Röhren sind sowohl mechanisch als auch elektrisch empfindlich. Schon verhältnismäßig geringe Erschütterungen können zum Reißen des Heizfadens führen; keinesfalls darf die maximal zulässige Heizspannung überschritten werden. Durch Überheizung wird die emittierende Schicht zerstört und die Röhre unbrauchbar (die Röhre wird „taub"). Bei direkt geheizten Rundfunkröhren liegen die Heizleistungen zwischen 35 und 140 mW.

1.1.2. Die indirekt geheizte Katode

Bei der indirekt geheizten Katode ist die Emissionsschicht auf einem dünnwandigen Nickelröhrchen, Katodenröhrchen genannt, aufgetragen. Dieses wird von innen her durch einen Heizdraht, den Brenner, auf die für die Emission erforderliche Temperatur von etwa 750 °C erhitzt. Der Brenner ist aus einem gestreckten oder gewendelten, meist bifilar gewickelten Wolframdraht hergestellt und gegen das Katodenröhrchen durch aufgesinterte Keramik isoliert. Die elektrische Trennung von Faden und Katode bietet in schaltungstechnischer Hinsicht einen wesentlichen Vorzug. Da die relativ dünne Isolation nicht optimal durchschlagssicher ist, darf die von den Röhrenherstellern für den jeweiligen Röhrentyp vorgeschriebene Höchstspannung zwischen Faden und Katode ($U_{f/k}$) nicht überschritten werden. Insbesondere gilt dies für die Serienschaltung der Fäden, bei der relativ große Gleich- und Wechsel-

spannungen zwischen Faden und Katode auftreten können. Für den zulässigen Spannungswert ist die Gleichspannung bzw. die Summe aus Gleichspannung und effektiver Wechselspannung anzunehmen. Auch bei indirekt geheizten Röhren müssen die vorgeschriebenen Heizdaten eingehalten werden. Erniedrigt oder erhöht man die Heizspannung oder den Heizstrom übermäßig, dann wird die Emissionsfähigkeit der Katodenschicht beeinträchtigt. Bei Unterheizung verarmt die Schicht an wirksamem Barium, während Überheizung die Schicht durch Verdampfen zerstört; auch muß mit einem Durchbrennen des Fadens gerechnet werden.
Die Heizleistungen indirekt geheizter Empfängerröhren liegen zwischen 1 und 5 Watt. Je nach Konstruktion beträgt die Anheizzeit der Katode bei E-Röhren 10 bis 40 und bei U-Röhren 20 bis 50 Sekunden.

1.1.3. Parallel- und Serienschaltung der Heizfäden

Werden mehrere Röhren in einem Gerät verwendet, so kann man die Heizfäden parallel oder in Reihe schalten.
Für die *Parallelschaltung* ist vorauszusetzen, daß alle Fäden die gleiche Heizspannung benötigen; diese ist Einstellwert (Bild 5). Die Heizströme (I_1, I_2 ...) aller Röhren addieren sich zu dem Gesamtstrom I_{ges}. Die Größe des Vorwiderstandes R_v für eine zu verwendende Röhre mit niedrigerer Heizspannung berechnet man nach der Formel $R_v = \frac{U_{ges} - U}{I}$ (Ω); (U_{ges} = Gesamtheizspannung, U = Heizspannung und I = Heizstrom für die betreffende Röhre).

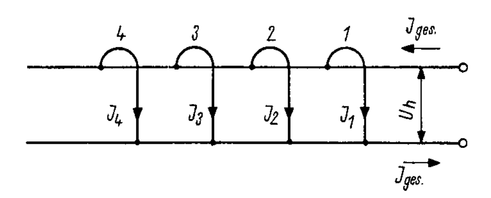


Bild 5 Schema der Parallelschaltung der Röhrenheizfäden

Die Parallelschaltung wird in Wechselstrom- und teilweise in Batterieempfängern angewendet.
Soll die Röhrenheizung wahlweise aus dem Wechselstrom- oder Gleichstromnetz erfolgen, dann ist die *Serienheizung* gebräuchlich (Bild 6). Bei dieser Schaltungsart müssen alle

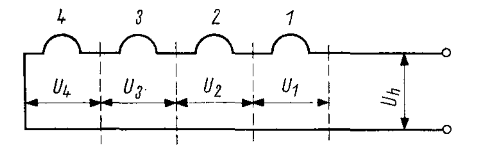


Bild 6 Schema der Reihenschaltung der Röhrenheizfäden

Heizfäden für den gleichen Strom ausgelegt sein; der Strom ist somit Einstellwert. Da sich bekanntlich Gleichstrom nicht transformieren läßt, steht zunächst die volle Netzspannung zur Verfügung. In der Heizkreisschaltung muß dann die Spannung, die sich aus der Differenz der vollen Netzspannung und der Summe der Heizspannungen sämtlicher Röhren ergibt, von einem Vorwiderstand R_v aufgenommen werden. Seine Größe wird nach der Formel

$$R_v = \frac{U - (U_1 + U_2 + U_3 \ldots)}{I} \ (\Omega)$$

berechnet; (U = Netzspannung, U_1, U_2, U_3, ... = Summe aller Heizspannungen und I = Heizstrom aller Röhren).
Sollte es erforderlich sein, eine Röhre mit unterschiedlichem Heizstrom zu verwenden, dann muß dem Heizfaden mit dem kleineren Strom ein Parallelwiderstand zugeschaltet werden.
Dieser errechnet sich nach der Formel $R_p = \frac{U}{I_{ges} - I}$ (Ω); (U = Heizspannung und I = Heizstrom der betr. Röhre, I_{ges} = Heizstrom des gesamten Stromkreises).
Überschreitet die Summe der Fadenspannungen die Netzspannung, wie das bei Geräten mit einer großen Anzahl von Röhren häufig der Fall ist, dann müssen zwei getrennte Heizkreise mit den entsprechenden Vorwiderständen gebildet werden.

Maßnahmen zur Begrenzung des Einschaltstromes wurden in Heft 23 dieser Reihe „Funktechnische Bauelemente Teil I", Abschnitt 1.3, beschrieben.
Hinsichtlich der Anordnung der Röhren im Heizkreis des Allstromempfängers, die infolge der unterschiedlichen Faden-Katoden-Spannung und der mehr oder weniger großen Brummempfindlichkeit der Röhren nicht gleichgültig ist, kann folgendes Schema dienen: gegen Masse (Chassis) spannungsführender Pol — Vorwiderstand—Heißleiter — Skalenbeleuchtungslampen — Netzgleichrichter-Röhre — Abstimmanzeige-Röhre — Endröhre — Zwischenfrequenzverstärker-Röhre(n) — Mischröhre — Demodulator-Röhre — Niederfrequenzvorverstärker-Röhre — Schaltungsnullpunkt (Masse)

1.2. Die Röhre mit Katode und Anode (Zweielektroden-Röhre, Diode)

Die Zweielektroden-Röhre mit Katode und Anode als Röhrensystem ist die einfachste Form der Elektronenröhre (Schaltsymbol Bild 7).

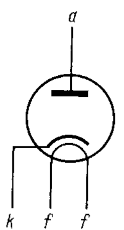


Bild 7
Schaltsymbol der Zweielektroden-Röhre

1.2.1. Anodenspannung und Anodenstrom

Da die glühende Katode die Elektronen liefert, muß (wenn es zu einem Elektronenfluß kommen soll) die Anode der Katode gegenüber positives Potential haben. Diese positive Spannung an der Anode, die *Anodenspannung*, bewirkt einen Strom von der Katode zur Anode, den *Anodenstrom* (Bild 8). Eine Um-

kehrung des Vorganges ist nicht möglich, weil die kalte Anode grundsätzlich keine Elektronen aussenden kann. Hieraus ergibt sich die Ventilwirkung der Zweielektroden-Röhre.

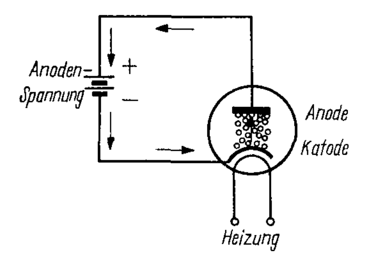


Bild 8
Der Anodenstrom

1.2.2. Der Sättigungsstrom

Erst bei einer bestimmten Mindestspannung gelangen sämtliche Elektronen, die aus der Katode austreten, zur Anode. Spannung, die eine „Sättigung“ der Anode bewirkt, nennt man *Sättigungsspannung*, den sich einstellenden Strom *Sättigungsstrom*. Eine weitere Steigerung der Anodenspannung ruft keine Zunahme des Anodenstromes hervor; der Strom bleibt konstant.
Die modernen Bariumpaste-Katoden werden nicht bis zur Sättigungsgrenze belastet, weil die hohen Sättigungsströme die Bariumschicht zu stark erhitzen würden. Damit die Katode nicht zerstört wird, kann der Elektronenbedarf nur aus der „Raumladungswolke“ gedeckt werden. Der Anodenstrom ist demzufolge wesentlich kleiner als der Sättigungsstrom.

1.2.3. Raumladung und Raumladestrom

Treten aus der Katode mehr Elektronen aus, als die Anode aufnimmt, dann befinden sich in der unmittelbaren Nähe der Katode freie Elektronen. Sie drängen die nachfolgenden gleichpoligen Elektronen zur Katode zurück, so daß sich um diese eine Elektronenwolke, eine *Raumladung*, ausbildet (Bild 9). Die abstoßende Wirkung läßt nur einen geringeren Anoden-

strom zu, obwohl er entsprechend der Emission der Katode größer sein müßte. Den von der Katode zur Anode fließenden Elektronenstrom bezeichnet man als *Raumladestrom.* Seine Größe hängt wesentlich von der negativen Raumladung vor der Katode ab.

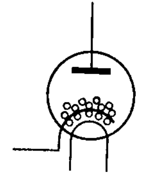


Bild 9
Raumladung an der Katode

Der Strom/Spannungsverlauf bei positiven Anodenspannungen wird durch die Anzahl der zwischen Katode und Anode befindlichen Elektronen bestimmt. Das Gebiet zwischen Anodenspannung Null und der Sättigungsspannung ist das *Raumladungsgebiet.* In diesem arbeitet die Zweielektroden-Röhre.

1.2.4. Der Anlaufstrom

Dieser Strom ist ein Emissionsstrom der durch Erhitzen der Katode entsteht. Infolge der Austrittsgeschwindigkeit der Elektronen aus der Katode erreicht ein kleiner Teil die Anode, ohne daß eine Anodenspannung anliegt. Der sich einstellende Strom wird als *Anlaufstrom* bezeichnet.

1.2.5. Die Kennlinie

Zwischen zwei sich ändernden elektrischen Größen einer Röhre (Strom, Spannung) kann man, bei konstanten übrigen Größen, Diagramme aufstellen, die die Abhängigkeit dieser Größen voneinander aufzeigen. Diese Darstellungen nennt man *Kennlinien.* Vorzugsweise werden die *Anodenstrom/Gitterspannungs-Kennlinie* und die *Anodenstrom/Anodenspannungs-Kennlinie* angewendet. In den Röhrendaten sind sie als *statische Kennlinien* aufgeführt. Um die Arbeitsweise einer

Röhre in der Schaltung beurteilen zu können, müssen die statischen Kennlinien in *dynamische* Kennlinien oder *Arbeitskennlinien* umgewandelt werden.
Die Zusammenhänge zwischen dem Anodenstrom I_a und der Anodenspannung U_a zeigt das Bild 10. Das Gebiet A entspricht dem Anlaufgebiet, in dem in der Diode bei fehlender oder schwach negativer Anodenspannung, der *Anlaufspannung*, ein von der Temperatur der Katode abhängiger Anlaufstrom fließt. Das anschließende Gebiet R entspricht dem Raumladungsgebiet. In diesem nimmt der Strom mit steigender Anodenspannung zu, und zwar so lange, bis der vom Material, der Oberfläche und der Temperatur abhängige Sättigungsstrom erreicht ist. Das Gebiet S stellt das Sättigungsgebiet dar. Es beginnt mit dem Einsetzen der Sättigungsspannung und wird dadurch gekennzeichnet, daß der Anodenstrom nicht mehr von der Anodenspannung abhängig ist, weil bereits alle aus der Katode ausgetretenen Elektronen am Anodenstrom beteiligt sind. Je höher die Katodentemperatur. um so größer der Absolutwert des Sättigungsstromes.

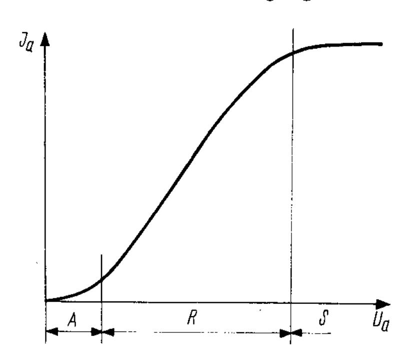


Bild 10 Der Anodenstrom als Funktion der Anodenspannung (I_a/U_a-Kennlinie)

1.2.6. Die Anodenbelastung

Treffen die von der Anodenspannung beschleunigten Elektronen auf die Anode auf, dann wird die Elektronengeschwin-

digkeit (bei 200 V Anodenspannung etwa 8000 km/s) plötzlich auf Null abgebremst. Hierbei setzt sich die den Elektronen innewohnende kinetische Energie (Bewegungsenergie) an der Anode in Wärme um. Die elektrische Leistung P_a, die diese Umsetzung bewirkt, ergibt sich aus dem Produkt der Anodenspannung U_a und dem Anodenstrom I_a; sie stellt die *Anodenbelastung* dar. Ihre maximale Größe ist durch das Wärmeabgabevermögen der Anode und die höchstzulässige Anodentemperatur gegeben. Bei zu hohen Anodentemperaturen besteht die Gefahr der Vakuumverschlechterung der Röhre durch Austritt von Gasen aus dem Anodenmaterial. Die Anodenbelastung wird für jeden Typ von den Röhrenherstellern angegeben. Eine weitere Folge des Elektronenaufpralls ist die Erzeugung von „Sekundärelektronen".

1.3. Die Eingitterröhre (Dreielektroden-Röhre, Triode)

Die Triode (Schaltsymbol Bild 11) ist durch eine in das Diodensystem eingefügte weitere Elektrode, das *Steuergitter*, gekennzeichnet. Das Steuergitter besteht aus einer Drahtwendel. Diese ist um die Katode angeordnet und liegt somit im Wege des Elektronenflusses.

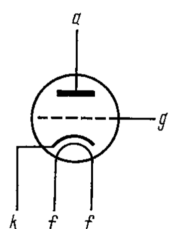


Bild 11
Schaltsymbol der Triode

Wie die Bezeichnung „Steuergitter" erkennen läßt, übt dieses Gitter eine Steuerwirkung aus. Sie besteht darin, daß der von der Katode zur Anode fließende Elektronenstrom in seiner Stärke, unabhängig von der jeweiligen Anodenspannung, beeinflußt wird. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, daß

geringe Änderungen der Gitterspannung *große* Änderungen des Anodenstromes hervorrufen.
Mit Hilfe einer Versuchsschaltung nach Bild 12 läßt sich die Wirkungsweise des Gitters anschaulich darstellen. Darüber hinaus kann man die in der Praxis interessierende Kennlinie, die den zahlenmäßigen Zusammenhang zwischen der steuernden Gitterspannung U_g und dem Anodenstrom I_a zeigt, aufnehmen. Die Einstellung der Gitterspannung geschieht mit dem Potentiometer P, der Anodenstrom wird am Strommesser I abgelesen.

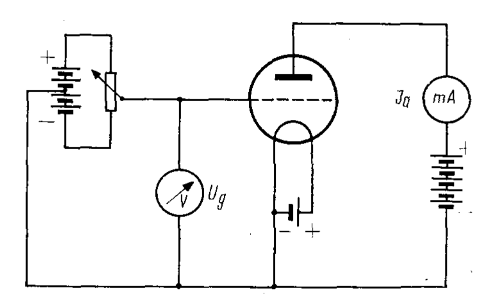


Bild 12 Versuchsschaltung zur Darstellung der Wirkungsweise des Steuergitters

Werden (der Katode gegenüber) negative Spannungen an das Gitter gegeben, hält dieses die Elektronen mehr oder weniger stark auf. Es gelangen also nur wenige oder — im Extremfall — überhaupt keine Elektronen zur Anode; dann zeigt das Instrument einen geringen oder keinen Anodenstrom an. Eine positive Gitterspannung bewirkt dagegen einen Anstieg des Stromes. Die Elektronen können in großer Anzahl die Anode erreichen, weil das Gitter praktisch deren anziehende Wirkung unterstützt (Bild 13).
Der bei positivem Gitter von der Katode zum Gitter fließende Strom ist der *Gitterstrom* I_g; er steigt mit wachsender Gitterspannung an. Da die Strecke Katode—Gitter als Diode aufgefaßt werden kann, gelten hierfür die entsprechenden Gesetzmäßigkeiten (s. 1.2.2. bis 1.2.4.).

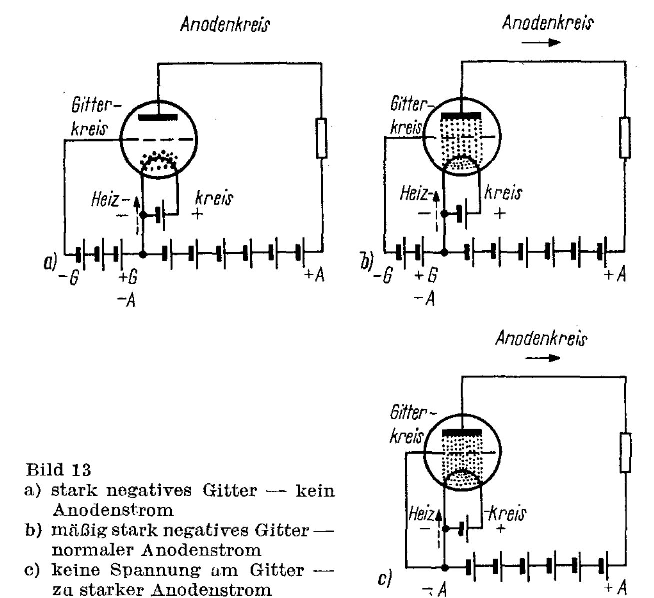


Bild 13
a) stark negatives Gitter — kein Anodenstrom
b) mäßig stark negatives Gitter — normaler Anodenstrom
c) keine Spannung am Gitter — zu starker Anodenstrom

Die Steuerung des Anodenstromes geschieht bei negativ vorgespanntem Gitter (man spricht dann von einer *Gittervorspannung*) leistungslos; d. h., es wird nur eine Spannung, jedoch kein Strom und somit auch keine Leistung benötigt.

1.3.1. Die Anodenstrom/Gitterspannungs- (I_a/U_g-)Kennlinie der Triode

Zur Beurteilung der Steuerwirkung und der sich aus dieser ergebenden Arbeitsweise der Röhre dient das I_a/U_g-Diagramm. Ein schematisches Beispiel zeigt Bild 14. In vertikaler Richtung ist der Anodenstrom, in horizontaler die Gitterspannung, positiv und negativ, aufgetragen.

Übereinstimmend mit den vorausgegangenen Betrachtungen kann man feststellen, daß der Anodenstrom um so kleiner wird, je negativer die Gitterspannung bzw. je größer die Gittervor-

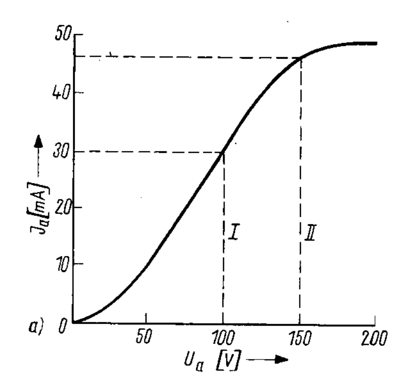


Bild 14a Das Anodenstrom/Anodenspannungs-Diagramm (I_a/U_a-Kennlinie)

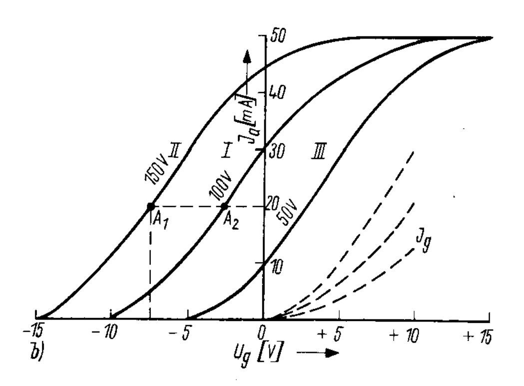


Bild 14b Das Anodenstrom/Gitterspannungs-Diagramm (I_a/U_g-Kennlinie)

spannung ist. Bei Gitterspannung Null entspricht die Stärke des Anodenstromes dem Wert, der aus der Kurve (Bild 14a) für die gewählte Anodenspannung entnommen werden kann. Bei 100 V sind das im Beispiel 30 mA. Dieser Wert ist auf der Kurve I (Bild 14b) vorhanden, wo die Gitterspannung 0 V beträgt. Erhält nun das Gitter eine wachsende negative Spannung gegen die Katode, so wird der Anodenstrom immer

kleiner, um bei einer bestimmten Gittervorspannung Null zu werden. In dem Beispiel trifft das für $U_g - 10$ V (Kurve I) zu. Mit positiver Gitterspannung steigt der Anodenstrom und erreicht bei einer bestimmten Gitterspannung seinen größten Sättigungswert ($U_g + 10$ V, Kurve I).

Beim Vergleich der beiden Kurven Bild 14a und 14b, ist festzustellen, daß die Anodenspannung von 0 auf 100 V gesteigert werden mußte, um einen Anodenstrom von 30 mA hervorzubringen. Das Gitter hat hierzu nur eine Steigerung von — 10 auf 0 V nötig. Sein Einfluß ist also 10mal größer als der der Anode; es kann (bei fester Anodenspannung, im Beispiel 100 V) mit einer Änderung der Gitterspannung um nur 10 V die gleiche Wirkung erzielt werden wie durch Änderung der Anodenspannung um 100 V (von 0 auf 100 V) bei fester Gitterspannung (0 V).

Wird an die Anode eine andere Spannung gelegt, angenommen 150 V, dann beträgt bei Gitterspannung 0 der Anodenstrom 46 mA (Kurve II nach Bild 14a, 14b). Der Anodenstrom sinkt erst bei einer größeren Gittervorspannung (— 15 V) auf 0 ab; bei positiver Gitterspannung steigt er bis zur Sättigung an. Für jede Anodenspannung wird eine von der Gitterspannung abhängige neue Kennlinie erhalten. Die zu verschiedenen Anodenspannungen gehörenden Kennlinien bilden eine Kennlinienschar, deren einzelne Kurven im wesentlichen parallel verschoben sind. Wenn die Anodenspannung erhöht wird, verschiebt sich die Kennlinie nach links; setzt man aber die Anodenspannung herab, dann wandert die Kennlinie nach rechts. Es kann also eine bestimmte Änderung des Anodenstromes auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen. Bei konstanter Gitterspannung 0 wird beim Übergang von der Kennlinie Anodenspannung 100 V auf die Kennlinie mit 150 V eine Anodenstromzunahme um 16 mA erzielt. Die gleiche Stromerhöhung kann bei jeder der beiden Kennlinien durch eine um 5 V kleinere Gittervorspannung erreicht werden.

Außer dem I_a/U_g-Kennlinienfeld muß zur Beurteilung der Röhre auch das Anodenstrom/Anodenspannungs-(I_a/U_a-) Kennlinienfeld (Bild 15) herangezogen werden. Wie bei der Diode steigt auch bei der Dreielektroden-Röhre der Anoden-

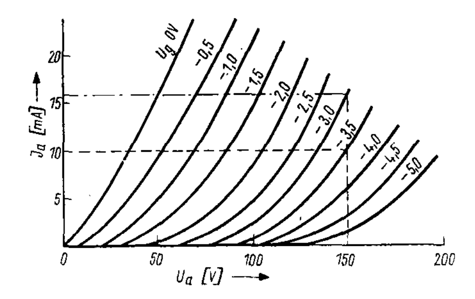


Bild 15 Das I_a/U_a-Kennlinienfeld

strom mit zunehmender Anodenspannung; jedoch kommen hier mehrere Kennlinien in Betracht. Die Lage der Kennlinien ist von der Gitterspannung abhängig. Als Beispiel sei die Anodenspannung 150 V herausgegriffen. Zur „oberen" Kennlinie gehört ein größerer Anodenstrom I_a als zur „unteren" (16 mA bzw. 10 mA). Demzufolge muß die obere Kennlinie für eine positivere Gitterspannung gelten als die untere; die Kennlinien rücken um so weiter nach oben, je positiver die Gitterspannungen werden. Röhren-Kennlinien sind für jede Röhrentype verschieden. Durch Serienfertigung bedingte Streuungen ergeben sich auch innerhalb des gleichen Types.

1.3.2. Der Arbeitspunkt

Ein im Zusammenhang mit der Röhren-Kennlinie wichtiger Begriff ist der *Arbeitspunkt.* Seine Lage auf der Kennlinie wird durch die Anodenspannung und die Gittervorspannung bestimmt.

Er gibt darüber Aufschluß, bei welchen Werten dieser Spannungen sich ein bestimmter Anodenstrom einstellt. In Bild 14 gehören zu dem willkürlich eingesetzten Arbeitspunkt die Anodenspannung 150 V und die Gittervorspannung — 7,5 V; bei diesen Werten „zieht" die Anode einen Strom von 20 mA.

In den Röhrenlisten der Röhrenhersteller ist mit der Angabe der Anodenspannung, der Gittervorspannung und des Anoden-

stromes der günstigste Arbeitspunkt festgelegt (z. B. EL 84 $U_a = 250$ V, $U_g = -7{,}5$ V, $I_a = 48$ mA). Die Betriebsspannungen und die Bauelemente einer Schaltung müssen so gewählt werden, daß sich der günstigste Arbeitspunkt einstellt.

Die grundlegenden Eigenschaften einer Röhre sind durch die Größen Durchgriff, Steilheit und Innenwiderstand gekennzeichnet.

1.3.3. Der Durchgriff

Der *Durchgriff* ist die Größe, die die Röhre hinsichtlich ihrer Arbeitsbedingungen am besten kennzeichnet. Mit dem Ausdruck „Durchgriff" wird die Vorstellung verbunden, daß die Anodenspannung durch die Windungen des Gitters auf die Katode „durchgreift". Der Durchgriff hängt vom konstruktiven Aufbau des Elektrodensystems ab: Je enger die Windungen des Gitters und je kleiner dessen Abstand von der Katode, desto kleiner der Durchgriff. Zwischen Anode und Katode besteht ein relativ großer Abstand. Deshalb ist der Einfluß der Anodenspannung auf den Anodenstrom kleiner als der Einfluß der Gitterspannung.

Der Durchgriff D stellt das bei konstantem Anodenstrom gemessene Verhältnis der Steuergitterspannungsänderung zur Anodenspannungsänderung dar. Er wird in Prozent angegeben:

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} (\%) \text{ bei } I_a \text{ konstant;}$$

(Δ, gespr. Delta, ist das Symbol für „endliche Änderung"). Als Beispiel sei ein Durchgriff D von 10% (D = 0,1) angenommen. Das bedeutet, daß eine Anodenstromänderung ΔI_a, die infolge einer Gitterspannungsänderung ΔU_g von beispielsweise 5 V hervorgerufen wird, erst durch eine Anodenspannungsänderung ΔU_a vom 10fachen Wert der Gitterspannung, also 50 V, zu erzielen ist. Entsprechend kann man auch sagen: Eine Erhöhung der Anodenspannung um 50 V wird durch eine Vergrößerung der Gitterspannung um 5 V ausgeglichen. Wenn man die im Diagramm (Bild 14) angenommenen entsprechenden Werte in die Formel einsetzt, ergibt sich:

$$D = \frac{7{,}5\ V - 2{,}5\ V}{150\ V - 100\ V} = \frac{5\ V}{50\ V} = 0{,}1 = 10\%.$$

Ob in der Praxis eine Röhre mit großem oder kleinem Durchgriff zu wählen ist, hängt von den Aufgaben ab, die sie zu erfüllen hat. Bei großem Durchgriff wird zwar mit geringen Anodenspannungen ein starker Anodenstrom erzielt, jedoch ist die Wirkung der Gitterspannung relativ gering. Geringe *Steuerwirkung* bedeutet aber mäßige Verstärkung.

Der Durchgriff ist immer kleiner als 1. Im theoretischen Fall D = 1 wäre eine Steuerwirkung überhaupt nicht mehr vorhanden und die Verstärkung gleich Null.

Bei Empfängerröhren liegt der Durchgriff zwischen 1 und 20%.

Die Verstärkung ist dem Durchgriff umgekehrt proportional; der reziproke Wert wird als *Verstärkungsfaktor* μ bezeichnet:

$$\mu = \frac{1}{D}.$$

Für D = 10% wäre $\mu = 10 \left(\frac{1}{0{,}1}\right)$.

Der Verstärkungsfaktor ist zwar ein Maß für die Verstärkung der Röhre, gibt aber nicht ohne weiteres den absoluten Wert der erreichbaren Verstärkung an; es muß der Röhren-Innenwiderstand R_i berücksichtigt werden (s. 1.3.5.).

1.3.4. Die Steilheit

Das Maß für die Steigung der Kennlinie ist die *Steilheit.* Je nach konstruktivem Aufbau der Röhre und deren Betriebsbedingungen ist die Steilheit größer oder kleiner. Große Steilheit bedingt eine großflächige und elektronenergiebige Katode sowie eine möglichst nahe an die Katode herangebrachtes Gitter. (Besonders die modernen Spanngitterröhren erfüllen diese Voraussetzung. Diese in Novalausführung hergestellten Röhren besitzen ein auf einem Molybdänrahmen gewickeltes Gitter aus 8 μm-Wolframdraht, das in einem Abstand von etwa 50 μm um die Katode angeordnet ist.)

Die Steilheit S, die sich unmittelbar aus der Neigung der I_a/U_g-Kennlinie ergibt, ist das Verhältnis der Änderung des

Anodenstromes zur Änderung der Gitterspannung bei konstanter Anodenspannung, ausgedrückt in mA/V:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \text{ (mA/V) bei } U_a \text{ konstant.}$$

Steilheitsmessungen werden vorgenommen, indem bei konstanter Anodenspannung die Gitterspannung um einen gewissen Betrag geändert und die zugehörige Anodenstromänderung festgestellt wird. Erhöht man entsprechend dem Diagramm (Bild 14) bei U_a 100 V die Gittervorspannung von – 2,5 V auf – 5 V, also um 2,5 V, dann sinkt der Anodenstrom von 20 mA auf 10 mA, um 10 mA ab. Die Steilheit beträgt somit $\frac{10 \text{ mA}}{2{,}5 \text{ V}} = 4$ mA/V.

Während im geradlinigen Teil der Kennlinie größere Gitterspannungsänderungen ausreichen, wird im gekrümmten Teil die Steilheitsbestimmung nur dann genau, wenn ganz geringe Änderungen der Gitterspannung vorgenommen werden, denn hier ist die Neigung nicht gleichbleibend.

Entsprechend dem Verhältnis zwischen Gitterspannung und Anodenstrom verläuft die Kennlinie mehr oder weniger steil. Je größer die zu 1 V Gitterspannungsänderung gehörende Anodenstromänderung, desto größer die Steilheit (Bild 16).

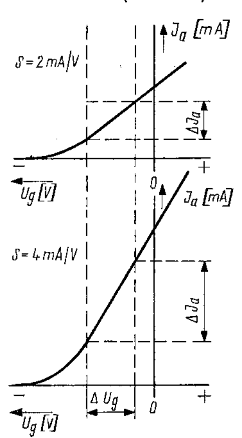


Bild 16
Die Röhrensteilheit

Bei gekrümmten Röhren-Kennlinien kommt es sehr auf die Lage des Arbeitspunktes an; die Steilheit ist in jedem Arbeitspunkt eine andere. Handelt es sich um eine geradlinige Kennlinie, dann hat die Lage des Arbeitspunktes keinen Einfluß auf die Steilheit. Es ist ohne weiteres möglich, aus der Steilheit eindeutige Schlüsse hinsichtlich der Steuerfähigkeit der Röhre zu ziehen. Wie man aus den obigen Darlegungen erkennt, sind „steile" Röhren besser zu steuern als wenig steile. Röhren mit großer Steilheit gestatten bei gleichen Gitterspannungsänderungen größere Anodenstromschwankungen, was in bezug auf die Anwendung der Röhren für Verstärkerzwecke von großer Bedeutung ist.

1.3.5. Der Innenwiderstand

Der *innere Widerstand* R_i der Röhre ist ein von den Betriebsbedingungen abhängiger Wechselstromwiderstand zwischen Katode und Anode. Er bildet den Quotienten aus der Änderung der Anodenspannung und der Änderung des Anodenstromes bei konstanter Gitterspannung, ausgedrückt in Ω:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \ (\Omega) \text{ bei } U_g \text{ konstant.}$$

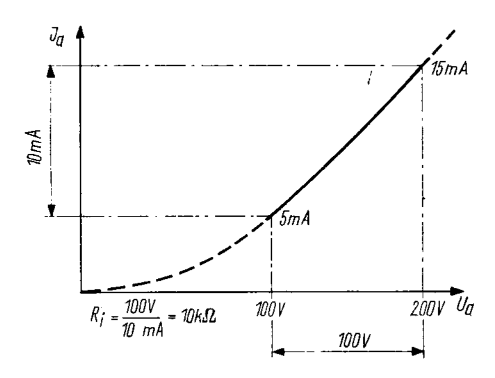


Bild 17 Der Röhren-Innenwiderstand

Der Innenwiderstand ist am kleinsten an der Stelle der maximalen Steilheit und wird nach dem unteren und oberen Knick der Kennlinie hin immer größer, bis er einen unendlichen Wert erreicht. Da der Innenwiderstand keine konstante Größe ist, gilt der in den Röhrendaten angegebene Wert nur für den Arbeitspunkt, der der vorgeschriebenen Gittervorspannung entspricht. Zu jedem Arbeitspunkt gehört bei einer gekrümmten Kennlinie ein anderer Innenwiderstand. Er kann aus der I_a/U_a-Kennlinie annähernd bestimmt werden. Aus dem Diagramm (Bild 17) ergibt sich für U_g 0 V ein R_i von $\frac{100\ V}{10\ mA} = 10\ k\Omega$. Bei Mehrgitterröhren liegen die Röhren-Innenwiderstände um zwei Zehnerpotenzen höher.

1.3.6. Die Barkhausensche Röhrenformel

Die drei Größen Durchgriff, Steilheit und Innenwiderstand sind durch eine von *Barkhausen* entwickelte Formel miteinander verknüpft:

$$\frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \cdot \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = 1\,, \quad \text{also} \quad D \cdot S \cdot R_i = 1\,.$$

Hieraus folgt: $D = \frac{1}{R_i \cdot S}$; $S = \frac{1}{D \cdot R_i}$; $R_i = \frac{1}{D \cdot S}$.

Die Größen sind in den Grundeinheiten einzusetzen: A/V für S, Ω für R_i, D in Dezimalschreibweise (z. B. 5% = 0,05).

1.3.7. Die Röhrenkapazitäten

In den technischen Daten für Elektronenröhren sind einige Kapazitätswerte angegeben. Diese beziehen sich auf die zwischen den einzelnen Elektroden vorhandenen Kapazitäten. Ihre Bedeutung geht aus der Bezeichnung hervor; zwischen Gitter und Anode liegt die Kapazität $c_{g/a}$, zwischen Anode und Katode $c_{a/k}$ usw. Die wichtigsten *Röhrenkapazitäten* sind in das Schaltsymbol (Bild 18) eingezeichnet. Die Gitter-Katoden-Kapazität ist eine *Eingangskapazität*, die Anoden-

Katoden-Kapazität eine *Ausgangskapazität*; in den Röhrendaten werden diese Kapazitäten mit c_e bzw. c_a bezeichnet. Infolge der Rückwirkung des Anodenkreises auf den Gitterkreis einer Schaltung nennt man die Gitter-Anoden-Kapazität auch *Rückwirkungskapazität.* Eine derartige Rückwirkung ist in Empfängerschaltungen unerwünscht, dagegen wird sie in Sendern zur Schwingungserzeugung durch Selbsterregung ausgenutzt. Obwohl die Kapazitäten äußerst gering sind und mitunter nur einen kleinen Bruchteil eines Picofarads betragen, können sie sich ungünstig auswirken. Besonders ist die bei Trioden relativ große Gitter-Anoden-Kapazität schädlich; ihre Wirkung muß eventuell durch schaltungstechnische Maßnahmen kompensiert werden.

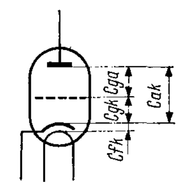


Bild 18
Die Röhrenkapazitäten

Wie aus den Darlegungen hervorgeht, zeigt die Triode einige Mängel, die für viele Anwendungszwecke mehr oder weniger nachteilig sind. So erweist sich in vielen Schaltungen der Innenwiderstand als zu gering, der hohe Durchgriffswert ermöglicht nur geringe Spannungsverstärkung, und die relativ große Gitter-Anoden-Kapazität bedingt Rückwirkungen.
Mit weiteren zwischen Anode und Steuergitter eingefügten Gittern können sowohl die aufgezeigten Unzulänglichkeiten der Triode beseitigt, als auch sonstige Vervollkommnungen geschaffen werden, so daß derartige Röhren den erhöhten Ansprüchen der modernen Schaltungstechnik entsprechen.

1.4. Mehrgitterröhren

Die erste Mehrgitterröhre war die *Doppelgitterröhre.* Sie konnte, je nach Schaltung, als *Raumladegitter-* oder als *Anodenschutz-*

gitterröhre sowie zur *Doppelsteuerung* in Mischschaltungen verwendet werden. Heute ist diese Röhre bedeutungslos.

1.4.1. Die Schirmgitterröhre (Tetrode)

Das Kennzeichen der *Schirmgitterröhre* oder *Tetrode* (Schaltsymbol Bild 19) ist ein zwischen Anode und Steuergitter eingefügtes Hilfsgitter, das ebenfalls aus einer Drahtwendel besteht. Da dieses zweite Gitter eine Abschirmwirkung ausübt, wird es als Schirmgitter bezeichnet. Es erhält der Katode gegenüber eine positive Spannung, die jedoch geringer als die Anodenspannung sein muß. Infolge des positiven Schirmgitters werden die negativen Elektronen auf ihrem Weg zur Anode stark beschleunigt, so daß sie mit großer Wucht auf die Anode aufprallen. Dieser Effekt schmälert wesentlich die Vorzüge, die das Schirmgitter hinsichtlich der Arbeitsweise dieser Röhre gebracht hat.

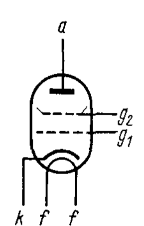


Bild 19
Schaltsymbol der Tetrode

Die grundsätzliche Bedeutung des Schirmgitters liegt darin, daß es das Steuergitter von der Anode statisch abschirmt. Damit wird die Gitter-Anoden-Kapazität, die sich nunmehr aus zwei hintereinanderliegenden Kapazitäten zusammensetzt, erheblich verringert. Im Hinblick auf die meist unerwünschte Anodenrückwirkung ist das von großer Bedeutung. Durch das Schirmgitter wird gleichzeitig der Durchgriff verkleinert, denn die Anodenspannung hat nur noch geringen Einfluß auf den Elektronenstrom. Der kleinere Durchgriff läßt wesentlich höhere Verstärkungen erzielen, als das mit Trioden der Fall ist. Außerdem wird der Innenwiderstand günstig

beeinflußt, was besonders für Verstärkerschaltungen wichtig ist.

Naturgemäß wirkt eine Änderung der Schirmgitterspannung auf den Emissionsstrom I_e ein, so daß auch dem Schirmgitter ein Durchgriff zugeordnet werden muß. Er wird als Schirmgitterdurchgriff D_s bezeichnet.

$$D_s = \frac{\Delta U_{g1}}{\Delta U_{g2}} (\%) \text{ bei } U_a \text{ und } I_e \text{ konstant;}$$

ΔU_{g1} = Änderung der Steuergitterspannung, ΔU_{g2} = Änderung der Schirmgitterspannung, U_a = Anodenspannung, I_e = Emissionsstrom.

Der Schirmgitterdurchgriff ist relativ groß, weil das Schirmgitter nahe am Steuergitter liegt.

Unter dem Einfluß des Schirmgitters erfolgt ein heftiger Elektronenaufprall auf die Anode, aus der sich dann die sogenannten *Sekundärelektronen* auslösen. Ist die Anode gegenüber dem Schirmgitter positiv, dann kehren die Elektronen wieder zu dieser zurück. Die in Bild 20 wiedergegebene I_a/U_a-Kennlinie zeigt die Auswirkungen der Sekundärelektronen und läßt erkennen, daß die Schirmgitterspannung die Anodenspannung nicht überschreiten darf. Das bedingt einen eingeengten Aussteuerungsbereich. Deshalb ist der Wirkungsgrad der Röhre verhältnismäßig gering. Zumindest als Empfängerröhre befriedigt die Arbeitsweise der normalen Schirmgitterröhre wenig; sie wird daher heute nur noch als Senderöhre im UKW- und Fernsehbetrieb verwendet.

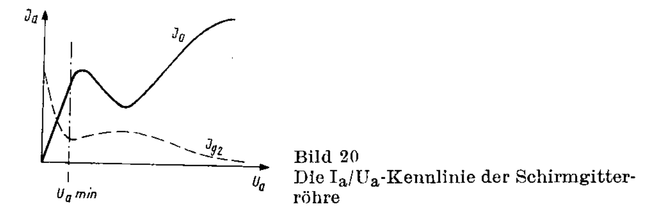


Bild 20
Die I_a/U_a-Kennlinie der Schirmgitterröhre

Die in der DDR nicht mehr hergestellten Endtetroden mit Pentodencharakter (z. B. AL 4, EL 11) sind dadurch gekennzeichnet, daß die Schirmgitterdrähte durch die Steuergitter-

drähte gegen das Auftreffen von Elektronen abgeschirmt werden. Zur Bündelung der Elektronenstrahlen und Unterdrückung des Sekundärelektronenflusses von der Anode zum Schirmgitter dienen ferner zwei auf Katodenpotential liegende Strahlbleche (beam plates; daher auch die Bezeichnung „Beam-power-Röhren", „Beam-power-Tetroden"). Die I_a/U_a-Kennlinie dieser Röhren unterscheidet sich von der einer Pentode durch den steileren Stromanstieg bei kleiner Anodenspannung; der „Knick" wird früher erreicht.

1.4.2. Die Bremsgitterröhre (Pentode)

Das Merkmal der *Bremsgitterröhre* oder *Pentode* (Schaltsymbol Bild 21) ist ein zwischen Schirmgitter und Anode eingefügtes drittes Gitter. Den Aufbau der Röhre zeigen die Bilder 22a bis d.

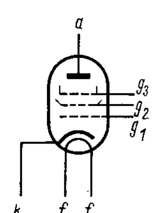


Bild 21
Schaltsymbol der Pentode

Das als *Bremsgitter* bezeichnete Hilfsgitter liegt im allgemeinen auf Katodenpotential (Nullpunkt), ist also dem Schirmgitter und der Anode gegenüber negativ. Das dritte Gitter hat die Aufgabe, die aus der Anode austretenden Sekundärelektronen unwirksam zu machen. Da sie negativ geladen sind, werden sie am Bremsgitter abgestoßen und gelangen zur Anode zurück; es sorgt für eine negative Raumladung vor der Anode. Das Schirmgitter ist damit nicht zu beeinflussen. Das I_a/U_a-Diagramm ist durch eine stetig verlaufende Kennlinie gekennzeichnet. Typische Pentodenkennlinien sind in Bild 23 zu sehen. Sie verlaufen über einen großen Anodenspannungsbereich nahezu horizontal, da der Anodenstrom in diesem

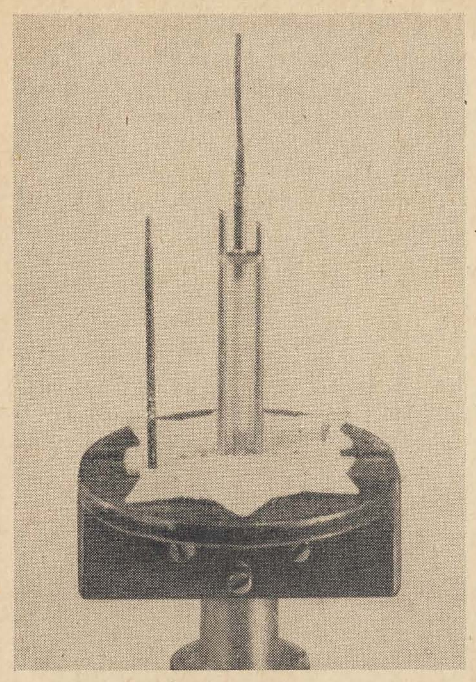


Bild 22 Der Elektrodenaufbau einer Pentode
a) Glimmer-Grundplatte, Katode und Gitter 1 auf der Aufbaulehre

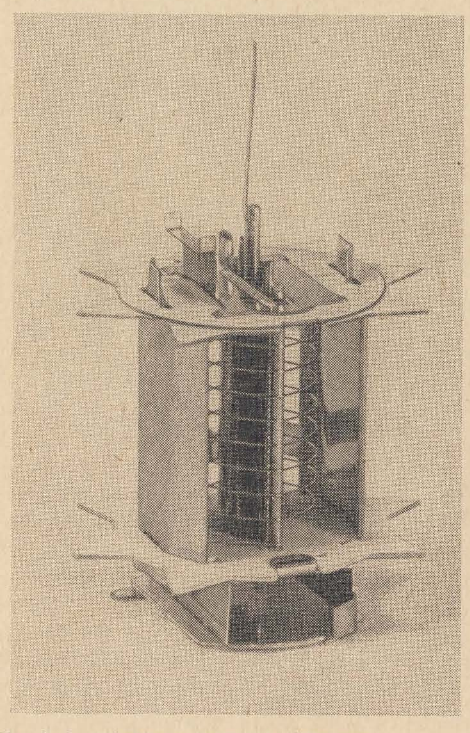
Gebiet von der Anodenspannung fast unabhängig ist. Erst bei niedrigen Anodenspannungen wirkt sich der Einfluß der Anodenspannung auf den Anodenstrom aus, so daß die Kennlinien gegen den Nullpunkt zu gekrümmt sind. Bei diesen Spannungen fließt fast der gesamte Anodenstrom zum Schirmgitter. Zugleich zeigt sich, daß das Verhältnis zwischen Schirmgitter- und Anodenstrom im eigentlichen Arbeitsgebiet, also dem horizontal verlaufenden Teil der Kennlinien, konstant ist.

Die Kennlinien gelten jeweils für einen bestimmten Wert der Schirmgitterspannung U_{g2}. Sie liegen um so höher, je positiver die Gittervorspannung U_{g1} ist. Die I_a/U_g-Kennlinie der Pen-

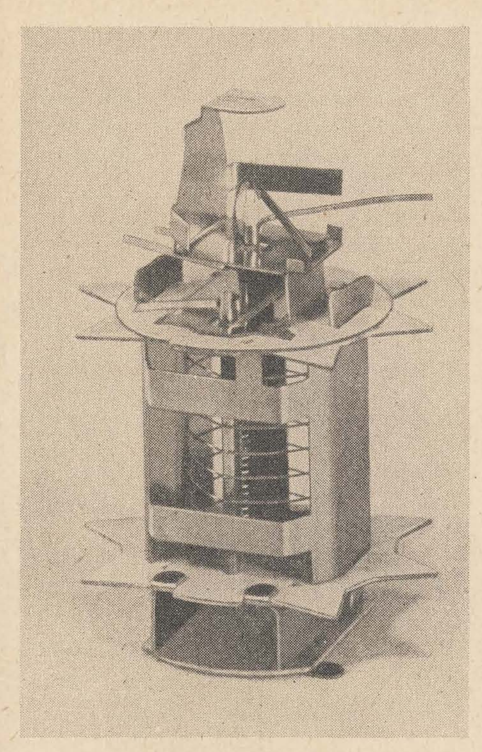
tode entspricht in ihrem Verlauf weitestgehend der Triodenkennlinie.

Je nachdem, ob eine Pentode im Hochfrequenz- oder Niederfrequenzgebiet verwendet wird, unterscheidet sie sich in bezug auf ihre Kennwerte. Folgende Forderungen werden an die Hochfrequenzröhren gestellt:

kleinster Durchgriff,
geringste Elektrodenkapazitäten,
besonders kleine $c_{g/a}$,
hoher Innenwiderstand.

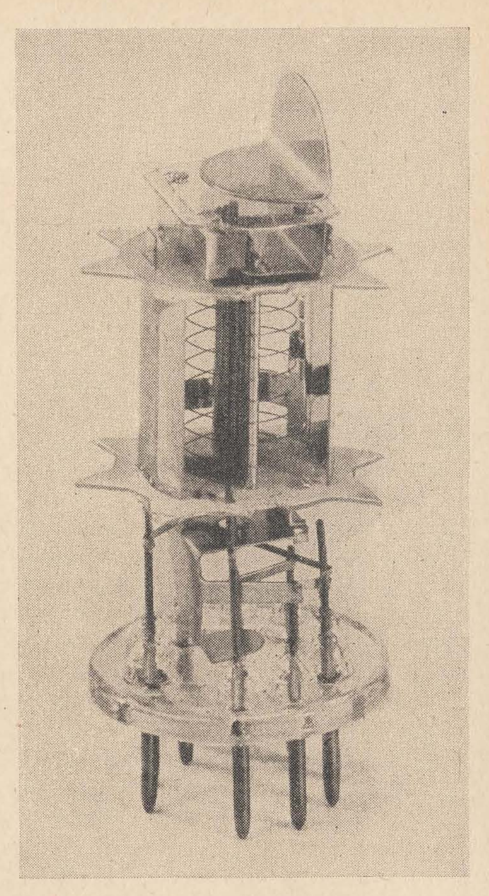


b) Zusätzlich Gitter 2, 3 und Anode montiert, Glimmer-Deckplatte aufgesetzt



c) kompletter Aufbau (ohne Abschirmmantel)

Um eine gute Verstärkerwirkung zu erzielen, muß die Röhre eine große Steilheit haben. Leistungspentoden (Endpentoden) unterliegen großer Anodenbelastung, die eine beträchtliche Erwärmung der Röhren zur Folge hat. Diese Wärme wird durch Kühlfahnen, großflächige, möglichst geschwärzte Anodenbleche und Kolben mit großer Oberfläche abgeleitet. Ein sehr heißer Röhrenkolben ist das „äußere" Merkmal für gute Wärmeabfuhr, ist also kein Anlaß zu Befürchtungen. Wenn Pentoden niederfrequente Leistungen verarbeiten sollen und von diesen Röhren keine besonders große Verstärkung



d) System mit Röhrenfuß (Preßteller) versehen

verlangt wird, sind sehr kleine Durchgriffe und geringe Elektrodenkapazitäten nicht erforderlich. Aus Anpassungsgründen sind die Röhren-Innenwiderstände bei NF-Endpentoden gering.

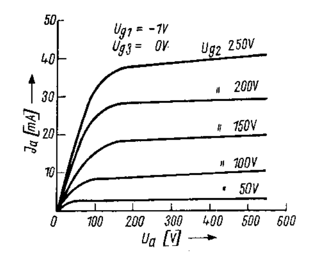


Bild 23
Das I_a/U_a-Kennlinienfeld der Pentode

1.4.3. Hexode und Heptode

Die *Hexode* besitzt 6 Elektroden, von denen 4 als Gitter ausgebildet sind: Gitter 1 = 1. Steuergitter, Gitter 2 = 1. Schirmgitter, Gitter 3 = 2. Steuergitter und Gitter 4 = 2. Schirmgitter (Schaltsymbol Bild 24). Während die Steuergitter negatives Potential haben, liegen die Schirmgitter an einer konstanten positiven Spannung. Die Spannung des 2. Schirmgitters ist niedriger als die Anodenspannung, um den Einfluß von Sekundärelektronen auszuschließen. Die Schirmgitter dienen zur Erhöhung des Röhren-Innenwiderstandes und setzen den Durchgriff herab.

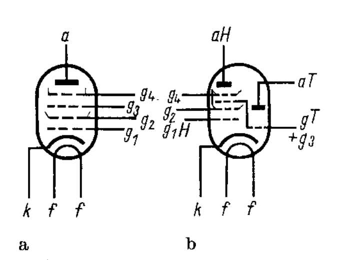


Bild 24a
Schaltsymbol der Hexode

Bild 24b
Schaltsymbol der Triode-Hexode

Die Lage der Kennlinien wird durch die Spannung am 2. Steuergitter (Gitter 3) bestimmt. Sie liegen um so niedriger, je negativer dieses Gitter ist. Dementsprechend nimmt auch die Steilheit ab. Die Bilder 25 und 26 zeigen je ein I_a/U_g- und I_a/U_a-Diagramm für die Hexode.

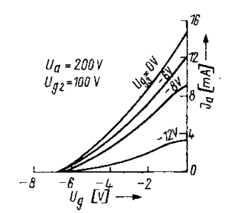


Bild 25
Die I_a/U_g-Kennlinie der Hexode

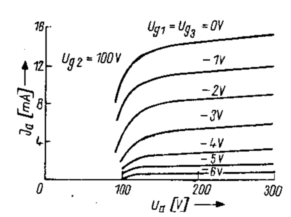


Bild 26
Die I_a/U_a-Kennlinie der Hexode

Vorzugsweise wurden Hexoden mit einem Triodensystem kombiniert. Diese Verbundröhre ist die *Triode-Hexode*. Sie wird, wie auch die Hexode, nicht mehr hergestellt.
Die *Heptode* ist eine Weiterentwicklung der Hexode mit einem zwischen dem 2. Schirmgitter und der Anode eingefügten 5. Gitter, das als Bremsgitter arbeitet (Schaltsymbol Bild 27). Im übrigen gilt die gleiche Elektrodenfolge wie bei der Hexode. Das Bremsgitter (Gitter 5), das innerhalb der Röhre mit der Katode verbunden ist und damit im allgemeinen auf Nullpotential liegt, setzt den Durchgriff weiter herab.
Es besteht in der Arbeitsweise kein bemerkenswerter Unterschied zur Hexode.

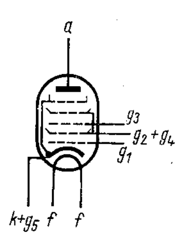


Bild 27
Schaltsymbol der Heptode

Meistens wird die Heptode mit einer Triode zur *Triode-Heptode* kombiniert (Bild 28). Im Gegensatz zur Triode-Hexode ist das Steuergitter der Triode mit dem 2. Steuergitter des anderen Systems *nicht* verbunden.
Die Triode-Heptode ist eine in neuzeitlichen AM-Empfängerschaltungen unentbehrliche Röhre.

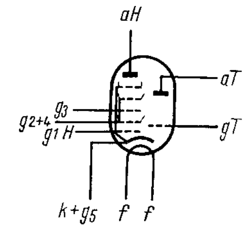


Bild 28
Schaltsymbol der Triode-Heptode

1.4.4. Oktode und Enneode (Nonode)

Die *Oktode* hat einen verhältnismäßig komplizierten Systemaufbau. Mit der Katode bilden die Gitter 1 und 2 (Steuergitter und Hilfsanode) ein Triodensystem, das zur Erzeugung der Oszillatorschwingungen dient. Gitter 3 und 5 sind miteinander verbundene Schirmgitter. Zwischen diesen befindet sich das Gitter 4, an das die Eingangsspannung gelegt wird. Gitter 6 ist das Bremsgitter. Die Oktode wurde früher in Mischschaltungen verwendet. Heute hat sie jedoch keine Bedeutung mehr.
Die *Enneode* oder *Nonode*, gelegentlich als φ-Detektor bezeichnet, ist eine Röhre mit 7 Gittern, von denen die Gitter 3 und 5 Steuergitter sowie die untereinander verbundenen Gitter 2, 4 und 6 Schirmgitter sind. Gitter 7 ist das Bremsgitter; es ist mit der Katode verbunden. Auf Katodenpotential liegt auch das Gitter 1, wenn die Röhre zur FM-Demodulation dient, für die sie in der Hauptsache entwickelt wurde. Die Enneode ist für funktechnische Schaltungen heute ohne besonderes Interesse.

1.4.5. Regelröhren

Zur Schwundregelung, die in allen besseren Rundfunkempfängern vorhanden ist, werden *Regelpentoden* und *Regelheptoden* verwendet. Diese Röhren unterscheiden sich von den gewöhnlichen nicht regelbaren Typen durch die besondere Ausführung des Steuergitters; es wird mit einer veränderlichen Steigung gewickelt (Bild 29).

Bild 29 Steuergitter der Regelröhre (schematisch)

Die Arbeitsweise der Regelröhren ist dadurch gekennzeichnet, daß durch eine selbsttätige Verlagerung des Arbeitspunktes die Verstärkung der Röhre geregelt werden kann.
Die Verstärkung einer Röhre wird grundsätzlich durch die Beeinflussung der Steilheit geändert, läßt sich aber auch durch eine Gitterspannungsänderung regeln, wenn die I_a/U_g-Kennlinie gekrümmt ist. Bei der normalen Pentode oder Heptode kann infolge des im wesentlichen linearen Verlaufes der Kennlinie keine brauchbare Steilheitsänderung erzielt werden. Dafür könnte man nur den unteren gekrümmten Teil der Kennlinie ausnutzen. Dieser Bereich ist aber sehr klein. Eine weitgehende Veränderung des Durchgriffs und damit der Steilheitsbedingungen kann mit dem *Regel-* oder *Exponentialgitter* erreicht werden. Jeder Arbeitspunkt auf der über den gesamten Bereich annähernd stetig gekrümmten Kennlinie ergibt eine andere Steilheit und demzufolge auch eine andere Verstärkung (Bild 30). Durch die Kennlinienkrümmung kann der Aussteuerungsbereich nicht sehr groß sein, wenn Verzerrungen vermieden werden sollen. (Der Aussteuerungsbereich ist der lineare oder annähernd lineare Teil der I_a/U_g-Kennlinie einer Röhre. Innerhalb dieses Bereiches sind die Schwankungen des Anodenstromes den Schwankungen der Gitterspannung etwa proportional.) Um den Aussteuerungsbereich zu erweitern,

werden in modernen Schaltungen die Regelröhren nicht mit konstanter Schirmgitterspannung betrieben, sondern es wird die *gleitende Schirmgitterspannung* angewendet. Das Schirmgitter erhält die Spannung über einen Vorwiderstand im Gegensatz zu nicht geregelten Röhren, bei denen man die Schirmgitterspannung mit einem Spannungsteiler erzeugt. Mit einer Änderung der Gittervorspannung ändert sich jetzt auch der Schirmgitterstrom, und folglich der am Schirmgitterwiderstand erzeugte Spannungsabfall. Dieser führt dann bei der Regelung Schwankungen der Schirmgitterspannung herbei. Um einen optimalen Wirkungsgrad der Regelung zu erzielen, werden in besseren Geräten mehrere Röhren der HF- und der NF-Stufe geregelt.

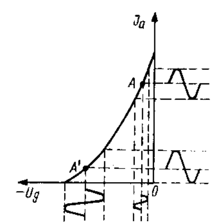


Bild 30
Die Arbeitsweise des Regelgitters (I_a/U_g-Diagramm)

Die Anwendungsmöglichkeiten der Elektronenröhre sind vielseitig. Sie dient zur Verstärkung und Gleichrichtung hoch- und niederfrequenter Wechselspannungen, zur Erzeugung von Hochfrequenzschwingungen, zur Mischung und zur Sichtbarmachung des Abstimmvorganges im Überlagerungsempfänger.

1.4.6. Abstimmanzeigeröhren

Die Abstimmanzeigeröhre (Schaltsymbol Bild 52) ist ein Spannungsindikator. Sie stellt eine Kombination einer normalen Triode, eines Anzeigesystems und einer Elektronenstrahlröhre dar. Die Anode der Triode ist (bzw. wird) mit zwei Steuerstegen verbunden, die zur Steuerung des Anzeigesystems dienen. Sowohl dieses als auch das Verstärkersystem ist über der gleichen Katode aufgebaut. Die im Anzeigeteil

aus der Katode austretenden Elektronen fliegen zu einem Leuchtschirm und werden durch ein Anzeigegitter oder die beiden Steuerstege beeinflußt. Vor diesen ist ein auf Katodenpotential liegendes Raumladegitter angebracht, das den Leuchtschirmstrom herabsetzt. Durch einen bestimmten Aufbau des Anzeigesystems wird der Elektronenstrom gebündelt, so daß auf dem Leuchtschirm ein definiertes Leuchtbild entsteht. Die Größe der Leuchtflächen ist von der Spannung zwischen dem Leuchtschirm und den Steuerstegen abhängig. Bei Aussteuerung des Verstärkersystems tritt an der Anode infolge des Spannungsabfalls über den Außenwiderstand R_a eine Spannungsänderung auf, die über die Steuerstege direkt die Leuchtfläche beeinflußt. Bei Spannungserhöhung am Steuergitter des Verstärkersystems werden die Leuchtflächen größer. Die Anregungsspannung der fluoreszierenden Leuchtschirmfläche beträgt etwa 90 V.

1.5. Die Röhre als Verstärker

Die Verstärkung von Spannungen und Leistungen ist eine der wichtigsten Aufgaben der Elektronenröhre.

1.5.1. Das Prinzip der Verstärkung

Wird die Gitterspannung um einen bestimmten Wert (bei konstanter Anodenspannung) geändert, so beeinflußt das den Anodenstrom (Abschnitt 1.3.1.). Die gleiche Wirkung ist zu erreichen, wenn man die statische Gitterspannung mit einer Wechselspannung, der *Gitterwechselspannung* $U_g \sim$, überlagert. Diese schwankt um den auf der Kennlinie mit A bezeichneten Arbeitspunkt, der durch die Gitterspannung in Verbindung mit der Anodenspannung festgelegt ist (Bild 31). Die nach unten verlaufende Kurve stellt eine Schwingung der Gitterwechselspannung $U_g \sim$ dar. Diese schwankt im Bereich -1 V und -5 V um den Wert -3 V, auf den die Gittervorspannung U_g eingestellt ist. Aus der nach rechts auslaufenden Kurve geht hervor, daß der Anodenstrom die entsprechen-

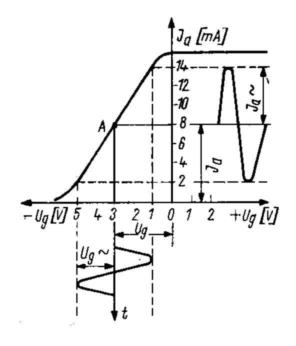


Bild 31
Das Prinzip der Verstärkung

den Schwankungen, jedoch mit einer größeren Amplitude, um den Arbeitspunkt ausführt. Genauso wie die Gitterwechselspannung $U_g \sim$ um die statische Gittervorspannung U_g, so schwankt der *Anodenwechselstrom* $I_a \sim$ um den Anodengleichstrom I_a. Zusammenfassend ist zu sagen: Zwischen den Schwankungen der Gitterwechselspannung und des Anodenwechselstromes besteht Proportionalität, d. h., $I_a \sim$ hat die gleiche Form wie $U_g \sim$, wenn der Vorgang im geradlinigen Teil der Kennlinie verläuft. Wird durch eine unverhältnismäßig große Amplitude der Gitterwechselspannung der lineare Aussteuerungsbereich der Kennlinie überschritten, treten durch Übersteuerung Verzerrungen auf (Bild 32). Liegt der Arbeitspunkt als Folge einer zu großen oder zu geringen Gittervorspannung zu tief oder zu hoch, dann wird die Anodenwechselstromkurve an der teilweise gekrümmten Kennlinie verformt (Bild 33), so daß auch hier Verzerrungen verursacht werden.

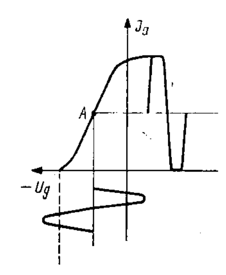


Bild 32
Übersteuerung infolge zu großer Wechselspannungsamplitude

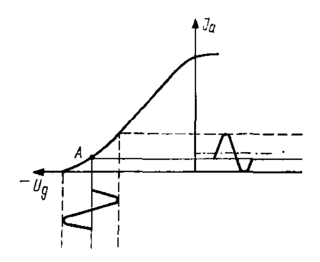


Bild 33
Übersteuerung infolge Verlagerung des Arbeitspunktes in den unteren Kennlinienknick

Die Steuerwirkung des Gitters ist um so größer, je steiler die Kennlinie verläuft (große Steilheit der Röhre). Aus Bild 34 geht hervor, daß sich mit einer kleinen Gitterwechselspannung der gleiche Anodenstrom einstellt wie mit einer großen Gitterwechselspannung bei weniger steiler Kennlinie. Die Verstärkung ist im ersteren Fall größer.

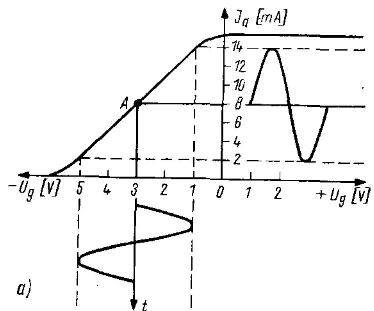


Bild 34a
Die Verstärkung bei geringer Röhrensteilheit

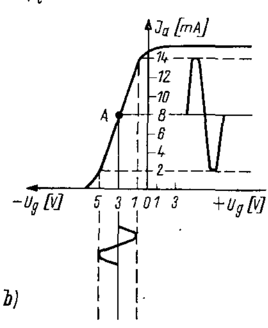


Bild 34b
Die Verstärkung bei großer Röhrensteilheit

1.5.2. Die dynamische Kennlinie

Im Anodenkreis (zwischen Anode und Katode geschalteter äußerer Belastungskreis der Röhre) liegt ein Widerstand, der je nach der Schaltung ein Ohmscher oder ein Wechselstromwiderstand (Schwingkreis, Transformator, Drossel) ist. Er wird als *Außen-* oder *Anodenwiderstand* R_a bezeichnet und stellt einen *Arbeitswiderstand* dar. Bei Steuerung der Röhre mit einer Gitterwechselspannung fließt der Anodenstrom über diesen Widerstand und ruft einen Spannungsabfall hervor. Die Anodenspannung hängt somit vom Anodenstrom ab; die am Außenwiderstand entstehende Wechselspannung ist die den Schwankungen des Anodenwechselstromes proportionale *Anodenwechselspannung* $U_a \sim$. Sie errechnet sich nach der Formel:

$$U_a \sim = \frac{-U_g \sim}{D} \cdot \frac{R_a}{R_a + R_i};$$

$U_a \sim$ = Anodenwechselspannung, $-U_g \sim$ = Gitterwechselspannung (Volt eff), R_a = Außenwiderstand, R_i = Innenwiderstand (Ω), D = Durchgriff (%, in Dezimalen).
Zur Beurteilung der Arbeitsweise einer Röhre mit einem bestimmten Außenwiderstand dient die *dynamische* oder *Arbeitskennlinie.* Sie zeigt die Abhängigkeit der einzelnen Größen im Arbeitszustand der Röhre auf und gestattet, alle für den Verstärkungsvorgang wichtigen Werte zahlenmäßig zu erfassen.
Grundsätzlich geht man vom statischen I_a/U_a-Kennlinienfeld aus. Als Beispiel ist in Bild 35 das Diagramm einer Triode dargestellt.
Zur Konstruktion der dynamischen Kennlinie ist zunächst der durch die Größen Anodenspannung, Anodenstrom und Gittervorspannung bestimmte Arbeitspunkt zu ermitteln. Hierzu werden zwei dieser in den Röhrendaten angegebenen Größen in das Diagramm eingesetzt; die dritte Größe ergibt sich von selbst. Als Beispiel sei angenommen: U_a 150 V und U_g — 3 V; es stellt sich somit I_a 3,5 mA ein. Wird durch den nunmehr definierten Arbeitspunkt eine Senkrechte gelegt — sie entspricht dem Außenwiderstand gleich Null —, ergeben sich

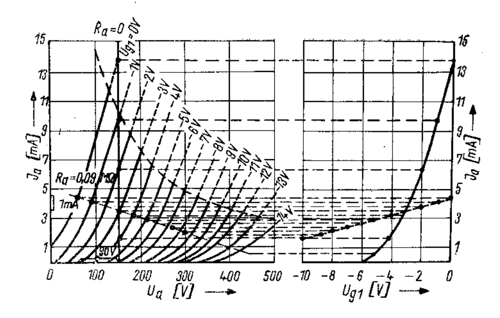


Bild 35 Die dynamische Kennlinie einer Triode

mit den Kennlinien für die verschiedenen Gittervorspannungen Schnittpunkte. Da sich im Anodenkreis der Röhre stets ein Außenwiderstand befindet, ändert sich mit der Gittervorspannung auch der Anodenstrom und, bedingt durch den Spannungsabfall am Widerstand, auch die Anodenspannung. Zur Darstellung dieses Vorganges muß in das Kennlinienfeld eine „Widerstandsgerade" eingezeichnet werden. Sie läuft durch den mit U_a 150 V und U_g — 3 V bestimmten Arbeitspunkt. Die Neigung der Geraden entspricht dem Spannungsabfall am Außenwiderstand. Es wurde ein R_a von 90 kΩ angenommen; ihm entspricht ein Spannungsabfall von 90 V bei einem Strom von 1 mA. Werden die Werte in das Dia-

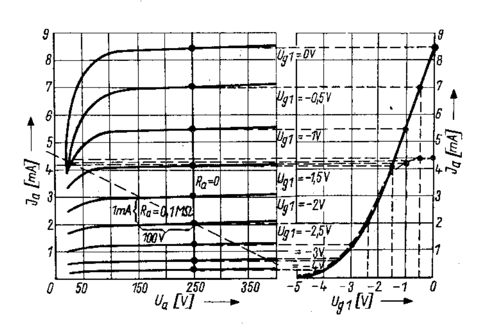


Bild 36 Die dynamische Kennlinie einer Pentode

gramm eingetragen, so bildet sich der Arbeitspunkt 60 V/ 4,5 mA (150 V — 90 V bzw. 3,5 mA + 1 mA). Mit ihm ist die Neigung der Widerstandsgeraden für R_a 90 kΩ bestimmt. Sie schneidet, wie die Gerade für $R_a = 0$, die Kennlinien für die verschiedenen Gittervorspannungen. Um ein dynamisches I_a/U_g-Diagramm zu erhalten, können die Schnittpunkte auf das Koordinatensystem dieses Diagramms übertragen werden.

In Bild 36 ist die Konstruktion der Arbeitskennlinie einer Pentode dargestellt. Es wurde der Arbeitspunkt gewählt, der sich aus einer Anodenspannung U_a 250 V und einer Gittervorspannung U_g — 2 V ergibt; der Arbeitswiderstand ist mit 100 kΩ angenommen worden (Spannungsabfall 100 V bei einem Strom von 1 mA).

Ein Vergleich der beiden Kennlinien zeigt eindeutig die Vorzüge der Pentode gegenüber der Triode. Bei der Pentode weicht die Arbeitskennlinie nur wenig von der statischen Kennlinie ab. Der von der Anodenspannung annähernd unabhängige Anodenstrom ergibt eine Arbeitssteilheit, die von der statischen Steilheit nur in bezug auf den Aussteuerbereich abweicht, der durch den oberen Knick der dynamischen Kennlinie eingeschränkt ist. Bei gleichen Außenwiderständen kann mit Pentoden eine weitaus größere Spannungsverstärkung erzielt werden als mit Trioden.

Im folgenden sind einige weitere Kennwerte zu erläutern, die sich u. a. im Zusammenhang mit der dynamischen Kennlinie ergeben.

Steuerspannung. Die Steuerspannung $U_{st} \sim$ ist die am Steuergitter wirksame Wechselspannung. Da bei Trioden die Anodenspannung nur mit dem Bruchteil $D \cdot U_a \sim$ auf den Anodenstrom einwirkt, ist $U_g \sim$ um dieses Produkt größer:

$$U_{st} \sim = U_g \sim + D \cdot U_a \sim;$$

($U_g \sim$ = Gitterwechselspannung, $U_a \sim$ = Anodenwechselspannung, D = Durchgriff).

Das Produkt $D \cdot U_a \sim$ wird als *Anodenrückwirkung* bezeichnet. Je größer sie ist, um so mehr beeinflußt eine Anodenspannungsänderung den Anodenstrom. In der Praxis wird auf eine eindeutige Gitterspannungssteuerung Wert gelegt, so daß für

Spannungsverstärkung Röhren mit kleinem Durchgriff erwünscht sind.

Bei Schirmgitterröhren wirkt sich im wesentlichen die Gitterspannung $U_{g1} \sim$ aus; die Anodenspannung ist nur mit einem ganz geringen Teil an der Steuerung des Anodenstromes beteiligt. Hier kann demzufolge

$$U_{st} \sim = U_{g1} \sim$$

gelten.

Verstärkung. Die Verstärkung v ist das Verhältnis der Anodenwechselspannung zur Gitterwechselspannung:

$$v = U_a \sim : U_g \sim .$$

Da die Änderungen von $U_a \sim$ auch von der Größe des Außenwiderstandes abhängig sind, gilt für die Eingitterröhre

$$v = \frac{1}{D} \cdot \frac{R_a}{R_i + R_a} = \frac{\mu R_a}{R_i + R_a} .$$

Große Verstärkung wird erzielt, wenn R_a größer als R_i ist. Mit $R_a = \infty$ kann (theoretisch) das Maximum der Verstärkung v_{max} erreicht werden. Bei Trioden ist sie der reziproke Wert des Durchgriffs D, also

$$v_{max} = \frac{1}{D};$$

diese Größe wird als *Verstärkungsfaktor* μ bezeichnet. Wenn $R_a = 0$, dann ist v ebenfalls 0; es findet keine Verstärkung statt. Deshalb sind große Spannungsverstärkungen nur mit Röhren möglich, die einen kleinen Durchgriff haben. Bei Trioden ist die praktisch mögliche Verstärkung $\mu = 100$.

Dynamische Steilheit (Arbeitssteilheit). Die dynamische Steilheit wird an der Arbeitskennlinie bestimmt. Da durch den am Arbeitswiderstand bedingten Spannungsabfall die Kennlinien flacher verlaufen als im statischen Kennlinienfeld, ist die Arbeitssteilheit kleiner. Sie verringert sich mit wachsendem Außenwiderstand. Ist der Innenwiderstand einer Röhre gegenüber dem Außenwiderstand groß, wie das für die Schirmgitterröhre zutrifft, unterscheidet sich die dynamische Steilheit nur wenig von der statischen.

Aussteuerung und Klirrfaktor. Im Niederfrequenzgebiet muß eine unverzerrte, verstärkte Anodenwechselspannung gefordert

werden. Hiermit kommt als verzerrungsfreier *Aussteuerungsbereich* nur der lineare Teil der Kennlinie in Betracht. Bei der Eingitterröhre ist der vom Durchgriff der Röhre abhängige Bereich schmal. Er läßt sich jedoch mit Schirmgitterröhren (Pentoden u. a.) erweitern.
Eine bei Nichtlinearität der Kennlinie verstärkte Schwingung enthält Oberwellen, die Verzerrungen, als *nichtlineare Verzerrungen* bezeichnet, hervorrufen. Das Maß für die Größe dieser Verzerrungen ist der *Klirrfaktor* k. Er gibt den Oberwellengehalt einer Wechselspannung in Prozent an. In Verstärkerschaltungen ist ein großer Klirrfaktor unerwünscht.
Die Anwendung der Röhre in Verstärkerschaltungen bedingt bestimmte, durch die Röhrendaten gekennzeichnete Betriebseigenschaften. Darum müssen die Betriebsbedingungen, unter denen die Röhre arbeitet, berücksichtigt werden.
Anfangsstufen- oder Vorverstärkerröhren haben die Aufgabe, eine optimale *Spannungsverstärkung* zu erzielen, wobei die abgegebene Leistung nicht berücksichtigt wird. Diese Röhren haben nur relativ kleine Amplituden zu verarbeiten; im allgemeinen spielt daher die Kennlinienkrümmung eine untergeordnete Rolle. Vorröhren dienen zur Verstärkung hoch- und niederfrequenter Spannungen.
Endröhren in Hochfrequenz- oder Niederfrequenzschaltungen sollen dagegen große Leistungen abgeben; die Spannungsverstärkung ist von zweitrangiger Bedeutung.

1.5.3. Die Endröhre

Wie schon aufgezeigt wurde, fließt bei angelegter Steuerspannung ein um den Gleichstrom-Arbeitspunkt schwankender Anodenwechselstrom, und am Außenwiderstand entsteht eine Anodenwechselspannung. Das Produkt aus beiden Größen ist eine Wechselstromleistung, bei Rundfunkgeräten u. ä. die *Sprechleistung*. Ihr Wert hängt von der absoluten Größe des Wechselstromes und der Wechselspannung sowie von der Größe des Außenwiderstandes im Verhältnis zum Röhreninnenwiderstand ab. Damit die Endröhre sowohl eine hohe Anodenwechselspannung als auch einen hohen Anodenwechsel-

strom abgeben kann, muß der Anodengleichstrom groß sein. Für große Leistungsverstärkung sind robuste Röhren erforderlich. Als Endröhren werden heute meistens Pentoden verwendet.

Der optimale Wirkungsgrad der Leistungsverstärkung wird durch Anpassung des Außenwiderstandes an den Innenwiderstand der Röhre erzielt. Der günstigste Wert für R_a wäre gleich dem von R_i. Diese „optimale Anpassung" kann in der Praxis jedoch nicht erreicht werden; der Wirkungsgrad ist stets kleiner als 100%.

Beispiel für einen nicht richtig dimensionierten Außenwiderstand:

Wirkung:	**Ursache:**
Anoden*strom* zu klein	zu großes Übersetzungsverhältnis des Ausgangsübertragers zur Lautsprecheranpassung (zu großer Außenwiderstand)
Anodenwechsel*spannung* zu klein	zu kleiner Außenwiderstand

Ein Teil der der Röhre zugeführten Leistung setzt sich durch den Elektronenaufprall an der Anode in Wärme um. Dieser Leistungsverlust ist die *Anodenverlustleistung* Q. Sie ist die Differenz aus der Anodenbelastung $P_a = I_a \cdot U_a$ und der Nutzleistung $P_a \sim$. Der maximale Wert der Anodenverlustleistung Q_{max} wird in den Röhrendaten angegeben.

Da die Verstärkung nicht verlustlos geschieht, ist der *Wirkungsgrad* stets kleiner als 100%. Er stellt das Verhältnis der an den Außenwiderstand abgegebenen Anodenwechselstromleistung zur aufgewendeten Anodengleichstromleistung dar:

$$\eta = \frac{P_a \sim}{P_a} \cdot 100\,\% \,.$$

1.5.3.1. Die Betriebsarten der Endverstärker-Röhre

Bisher wurde der Arbeitspunkt in die Mitte des geradlinigen Teiles der I_a/U_g-Kennlinie gelegt. Um Verzerrungen zu vermeiden, ist eine nur verhältnismäßig geringe Aussteuerung

möglich; der Verstärkung sind also keine weiten Grenzen gesetzt.
Unter solchen Bedingungen arbeitet die Röhre im *A-Betrieb*. Er ist in normalen Empfangsgeräten allgemein gebräuchlich. Eine erhebliche Erweiterung des Aussteuerbereiches läßt sich mit zwei im Gegentakt arbeitenden Röhren erzielen. Die Arbeitsweise dieser Anordnung geht aus Bild 37 hervor. Es zeigt zwei spiegelbildlich zueinander liegende Kennlinien, die an zwei Röhren entstehen, denen man eine gegenphasige Wechselspannung zuführt. Zur Aussteuerung einer Kennlinie wird jeweils eine Halbwelle der Steuerwechselspannung benutzt. Je nach der Lage des Arbeitspunktes ist zwischen B-, AB- und C-Verstärkung zu unterscheiden.

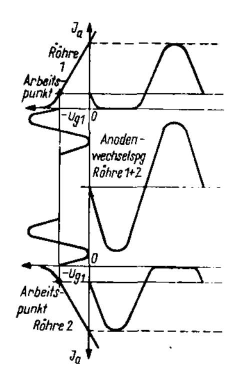


Bild 37
Das Prinzip der Gegentaktverstärkung

B-Verstärkung. Diese Betriebsart unterscheidet sich von der A-Verstärkung dadurch, daß der Ruhestrom (bei ungesteuerter Röhre fließender Anodenstrom) nahezu Null und die Gittervorspannung wesentlich größer als im A-Betrieb ist. Der Wirkungsgrad der B-Verstärkung ist sehr groß. Das Diagramm der im B-Betrieb arbeitenden Röhre zeigt Bild 38.
AB-Verstärkung. Der AB-Betrieb nimmt eine Zwischenstellung zwischen A- und B-Betrieb ein. Der Arbeitspunkt liegt zwar im unteren Teil der Kennlinie, jedoch so hoch, daß bei kleinen Steuerspannungsamplituden die beiden Halbwellen unver-

zerrt verstärkt würden. Die erwünschten großen Amplituden bewirken natürlich starke Verzerrungen der negativen Halbwelle (Bild 39). Der Wirkungsgrad ist geringer als im B-Betrieb.

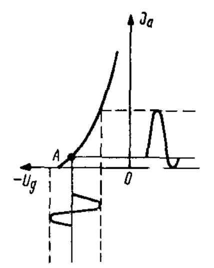


Bild 38
Die Arbeitsweise der Röhre als B-Verstärker

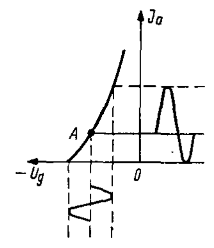


Bild 39
Die Arbeitsweise der Röhre als AB-Verstärker

C-Verstärkung. Bei dieser Betriebsart liegt der Arbeitspunkt weit im Gebiet negativer Vorspannung (Bild 40). In jeder der beiden Röhren fließt dann nur während eines Teiles der positiven Halbperiode der Gitterwechselspannung Strom. Es ergeben sich ganz erhebliche Anodenstromverzerrungen, die auch in einer Gegentaktschaltung nicht beseitigt werden können. Demzufolge hat der C-Betrieb für die Verstärkung tonfrequenter Spannungen keinerlei Bedeutung.

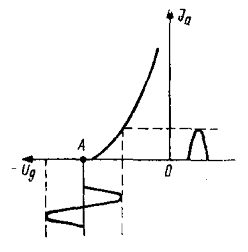


Bild 40
Die Arbeitsweise der Röhre als C-Verstärker

Im Senderbetrieb werden sowohl der B- als auch der C-Betrieb, in Eintakt- und Gegentaktschaltungen, bevorzugt angewendet. Der Außenwiderstand der Sender-Leistungsstufe ist ein Schwingkreis; er siebt die Grundwelle aus und schließt die Oberwellen kurz, so daß sich Verzerrungen nicht auswirken.

1.6. Die Röhre als Demodulator und Netzgleichrichter

Während für eine Verstärkung gittergesteuerte Röhren erforderlich sind, wird für die Hochfrequenzgleichrichtung (Demodulation) und die Netzfrequenzgleichrichtung im allgemeinen die Zweielektroden-Röhre verwendet. Die zur Demodulation dienende Röhre ist die *Diode*, für die Netzgleichrichtung sind *Netzgleichrichter-Röhren* gebräuchlich.

1.6.1. Das Prinzip der Gleichrichtung

Von der Tatsache ausgehend, daß die Elektronen von der erhitzten Katode austreten und von der kalten Anode angezogen werden, läßt sich eine Ventilwirkung der Elektronenröhre ableiten. Wird die positive Spannung einer Stromquelle an die Katode und die negative an die Anode gelegt, dann ist zwar die Anode elektronenreich, doch können aus ihr keine Elektronen austreten, weil eine kalte Katode keine Emission bringt; ein Elektronenfluß kommt nicht zustande. Die Ventileigenschaft kann nun zur Gleichrichtung hoch- oder niederfrequenter Spannungen und Ströme ausgenutzt werden. Eine an die Röhre gelegte Wechselspannung bewirkt nur dann einen Stromfluß, wenn A positiv und B negativ ist (Bild 41). Im anderen Fall wird die Röhre gesperrt. Während der positiven

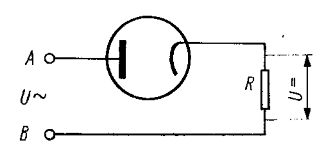


Bild 41
Grundschaltung der Diodengleichrichtung

Halbwelle des Stromes bildet sich eine entsprechende Spannungshalbwelle am Widerstand R aus, dagegen erscheint die negative Halbwelle nicht. Somit haben die am Widerstand auftretenden Spannungshalbwellen immer gleiche Richtung. Die Wechselspannung ist gleichgerichtet worden (Bild 42). Wie die Kurve erkennen läßt, erhält man keine reine Gleichspannung, sondern eine wellige, eine sogenannte pulsierende Spannung. Sie kann als Überlagerung zweier Spannungsanteile, einer Wechsel- und einer Gleichspannungs-Komponente, aufgefaßt werden. Es ist die Aufgabe von Siebschaltungen, die pulsierende Spannung in einen reinen Gleichstrom zu verwandeln.

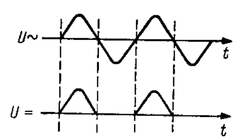


Bild 42
Die gleichgerichtete Wechselspannung

1.6.2. Die Diode als Hochfrequenzgleichrichter (Demodulator)

Infolge des Gleichrichtereffekts der Röhre wird, je nach Kennlinienverlauf, die negative Amplitude der hochfrequenten Schwingung vollständig oder nur teilweise unterdrückt. In einer Demodulatorschaltung führt man der Diode eine *modulierte* Wechselspannung, also keine gleichbleibende Wechselspannung, zu. Dadurch tritt am Belastungswiderstand R_a eine niederfrequente Spannung (Tonfrequenz) auf. Sie ist mit Wechselstromresten und einer bei der Gleichrichtung entstandenen negativen Gleichspannung behaftet. Nach Aussiebung dieser Spannungen steht die Niederfrequenz zur Aussteuerung des dem Demodulator nachgeschalteten Verstärkers zur Verfügung. Mittels der Diode können sowohl amplitudenmodulierte als auch frequenzmodulierte Hochfrequenzschwingungen gleichgerichtet werden. Zuvor sind die frequenzmodulierten Hochfrequenzschwingungen mit Hilfe eines Modulationsumformers (Flankendetektor, Diskriminator oder Verhältnisgleichrichter) in amplitudenmodulierte Schwin-

gungen umzuwandeln. Für die Gleichrichtung frequenzmodulierter Schwingungen sind zwei Diodenstrecken erforderlich. (Bei der Hochfrequenz-Gleichrichter-Röhre wird die Anode als Diode bezeichnet; unter Diodenstrecke ist der Weg Katode—Diode zu verstehen.)
Der Vorgang der Hochfrequenzgleichrichtung wird mit Bild 43 veranschaulicht. Die Darstellung zeigt die Gleichrichtung an einer linearen Kennlinie. Hier wird der negative Anteil der hochfrequenten Schwingung vollkommen abgetrennt, so daß eine verzerrungsfreie Gleichrichtung erfolgt. Bei gekrümmter Kennlinie ist die negative Halbwelle nicht restlos unterdrückt, und es treten Verzerrungen auf.

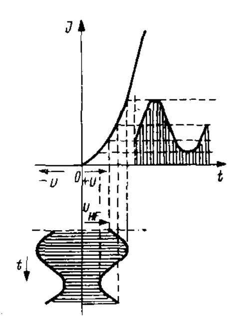


Bild 43
Der Mechanismus der Hochfrequenzgleichrichtung

Von den drei Arten der Hochfrequenzgleichrichtung, A-, B- und C-Gleichrichtung, wird in Empfängerschaltungen die B-Gleichrichtung angewendet. Ihr Kennzeichen ist der im unteren Knick der Kennlinie liegende Arbeitspunkt. Diese Lage stellt sich bei einer Vorspannung von etwa 0 V ein. Wie Bild 44 zeigt, erfolgt die Gleichrichtung annähernd linear. Die Fläche der gleichgerichteten Spannung ist der Wechselspannung proportional.
Mit positiver Vorspannung der Anode verschiebt sich der Arbeitspunkt zur Kennlinienmitte. Für kleine Amplituden erfolgt dann keine Gleichrichtung. Wechselspannungen, deren negative Halbwellen in den gekrümmten unteren Teil der

Kennlinie hineinreichen, ergeben einen annähernd quadratischen Zusammenhang zwischen Wechsel- und gleichgerichteter Spannung. Diese A-Gleichrichtung ist besonders bei Meßgeräten (u. a. S-Meter) von Bedeutung, für die eine zu messende Wechselspannung in einen Anzeigegleichstrom umgeformt werden muß.

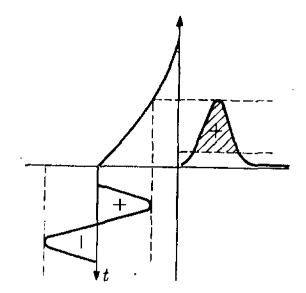


Bild 44
Das Prinzip der B-Gleichrichtung

Mit einer negativen Anodenvorspannung wird der Arbeitspunkt weit nach links verschoben, so daß nur bei sehr starker Aussteuerung der Röhre ein Strom fließt. In dieser C-Gleichrichtung passieren nur die Spitzen der positiven Wechselspannung die Röhre. Für Amplitudenbegrenzerschaltungen werden Dioden im C-Betrieb verwendet.
Eine einzige Diodenstrecke in einem Röhrenkolben ist unwirtschaftlich. Die Röhrenhersteller sind dazu übergegangen, Röhren mit zwei oder drei Diodensystemen und Kombinationen mit Ein- und Mehrgitterröhren zu konstruieren (Duodiode, Dreifachdiode-Triode, Diode-Pentode, Duodiode-Pentode).
Normalerweise betragen die Betriebswerte für Diodenstrecken bis 250 V und 5 bis 50 mA.

1.6.3. Die Röhre mit Gitter als Hochfrequenzgleichrichter

In den Anfangszeiten der Radiotechnik wurden ausschließlich Röhren mit Gitter als Hochfrequenzgleichrichter verwendet, ursprünglich Trioden, später Pentoden. Neben der Anoden-

gleichrichtung war die Gittergleichrichtung, meist als Audion bezeichnet, üblich. Beide Schaltungen ermöglichen gleichzeitig eine niederfrequente Verstärkung. In modernen Rundfunkempfängern verwendet man heute für Demodulationszwecke keine Röhren mit Gitter. Trotzdem soll ihre Arbeitsweise kurz beschrieben werden, da sie für den Amateur und Bastler noch interessant sind (Einkreisschaltungen, besonders Kurzwellenaudion).

1.6.3.1. Die Röhre als Anodengleichrichter

Im *Anodengleichrichter* oder *Richtverstärker* erhält die Röhre eine so hohe Gittervorspannung, daß der Arbeitspunkt weit in den unteren Knick der I_a/U_g-Kennlinie zu liegen kommt. Die negativen Halbschwingungen der zugeführten hochfrequenten Spannungen werden somit unterdrückt (Bild 45). Die Demodulation geschieht nur als Folge einer gekrümmten Kennlinie. Bei kleinen Trägerfrequenzamplituden erreicht man eine nahezu quadratische Gleichrichtung (s. 1.6.2.). Da mit einem großen Anodenwiderstand die Kennlinie verflacht wird, ist die Gleichrichtung etwa linear; mit großen Amplituden kann praktisch dann eine verzerrungsfreie Demodulation erzielt werden. Die Niederfrequenz wird gleichzeitig mit dem Dreielektrodensystem der Röhre verstärkt. Der Anodengleichrichter erfordert verhältnismäßig große Gitterwechselspannungen. Daher ist er für Kurzwellenbetrieb wenig geeignet.

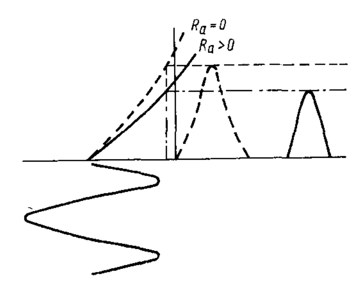


Bild 45
Das Prinzip der Anodengleichrichtung

1.6.3.2. Die Röhre als Gittergleichrichter (Audion)

Die Arbeitsweise des *Gittergleichrichters* oder *Audions* ist durch eine Demodulation mit Hilfe der Strecke Gitter/Katode — analog der Diodengleichrichtung — und durch eine nachfolgende Verstärkung der gleichgerichteten Hochfrequenz gekennzeichnet. Der Gleichrichtereffekt, der durch die Ventilwirkung der „Diodenstrecke" zustande kommt, wird aus der I_g/U_g-Kennlinie dargestellt; man nutzt den einsetzenden Gitterstrom zur Gleichrichtung aus (Bild 46). Der Arbeitspunkt liegt bei Gitterspannung Null und damit im Bereich der optimalen Krümmung der Gitterstromkennlinie. Beim Auftreten einer hochfrequenten Spannung am Gitter stellt sich ein Gitterstrom ein, so daß sich am Gitterwiderstand R_g die demodulierte Spannung aufbaut. Da diese Spannung gleichzeitig das Gitter der Röhre steuert, erscheint am Anodenwiderstand R_a die verstärkte niederfrequente Spannung.

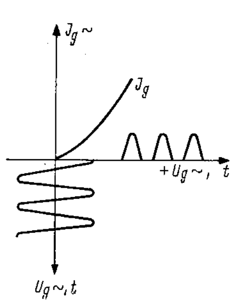


Bild 46
Das Prinzip der Gittergleichrichtung

Der Vorzug der Gittergleichrichtung liegt darin, daß schon mit geringsten Steuerspannungen, bedingt durch die hierfür günstige Kennlinienform, und mit der selbsttätig einsetzenden Verstärkung ein ausgezeichneter Wirkungsgrad zu erzielen ist. Der Nachteil besteht in der nicht mehr verzerrungsfreien Gleichrichtung und Verstärkung bei höheren Steuerspannungen. Einerseits wird die Demodulationskennlinie, andererseits die Anodenstromkennlinie übersteuert, weil dann der Ver-

stärkungsvorgang nicht mehr ausschließlich im geradlinigen Kennlinienbereich stattfindet.

1.6.4. Die Röhre als Netzgleichrichter

Zur Gleichrichtung von Netzwechselspannungen sind Zweielektroden-Röhren gebräuchlich. Die Katoden müssen ein großes Emissionsvermögen haben. Sie werden daher aus thorierten oder mit Bariumoxydschichten überzogenen Wolfram- oder Molybdänbändern hergestellt.
Gleichrichterröhren sind direkt, indirekt oder halbindirekt geheizt; die indirekte Heizung wird heute allgemein bevorzugt. Je nachdem, ob für Einweg- oder Doppelweggleichrichtung bestimmt, sind eine oder zwei Anode(n) vorhanden; von wenigen Ausnahmen abgesehen, haben sie eine gemeinsame Katode.
Bei der *Einweggleichrichtung* wird nur eine Halbwelle der gleichzurichtenden Wechselspannung verwertet, bei der *Doppel-* oder *Zweiweggleichrichtung* arbeitet in jeder Halbperiode jeweils eine der in Gegentakt geschalteten Anoden, so daß beide Halbwellen ausgenutzt werden (Bilder 47, 48).

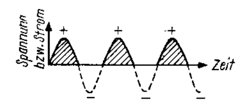


Bild 47
Einweggleichrichtung des Netzwechselstromes

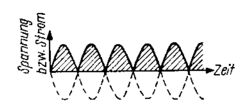


Bild 48
Zweiweggleichrichtung des Netzwechselstromes

Der an der Katode abgenommene Strom ist ein pulsierender Gleichstrom mit der Frequenz bzw. der doppelten Frequenz des Netzwechselstromes. Mit geeigneten Siebmitteln wird der Wechselstromanteil abgeleitet; es steht dann nahezu reiner Gleichstrom zur Verfügung.

1.7. Die Röhre als Schwingungserzeuger (Oszillator)

Die Röhre arbeitet als Generator, wenn durch Rückkopplung eines Teiles der (ausgangsseitigen) Anodenspannung auf das Gitter einer Gitterröhre eine Selbsterregung von Schwingungen hervorgerufen wird. Als frequenzbestimmendes Element dient ein an das Gitter oder an die Anode geschalteter Schwingkreis.

Die *Erzeugung von Oszillatorschwingungen* stellt an die Rückkopplung bestimmte Anforderungen:

1. Die rückgekoppelte Spannung muß phasenrichtig dem Gitter zugeführt werden;
2. sie muß eine Mindestgröße haben, um eine Selbsterregung hervorzubringen.

Die Rückkopplungsschwingungen sind mit dem Auftreten eines Gitterstromes verbunden. Seine Größe wird im wesentlichen von den Röhrendaten sowie von der angelegten Anoden- und Gitterspannung ($U_g = 0$ V) bestimmt. Für Trioden kann ein Gitterstrom von etwa 10% des Anodenstromes angenommen werden.

Das Verhältnis der Gitterwechselspannung zu der um 180° phasenverschobenen Anodenwechselspannung ist der Kopplungsfaktor k:

$$k = \frac{U_g \sim}{U_a \sim}.$$

Werden die Größen der Gleichung durch ihre Beziehungen mit dem Außenwiderstand $\mathfrak{R}_a$, dem Durchgriff D und der Steilheit S ersetzt, dann gilt:

$$k \geqq D + \frac{1}{S \cdot \mathfrak{R}_a}.$$

$\mathfrak{R}_a$ ist der hochfrequente Widerstand im Rückkopplungszweig (z. B. der Resonanzwiderstand des Schwingkreises). S ist die Steilheit der Kennlinie einer Röhren-Schwingschaltung, die bei den gegebenen We_ten für k, $\mathfrak{R}_a$ und D mindestens vorhanden sein muß, um die Bedingung der Selbsterregung zu erfüllen, d. h., um die Schaltung zum Schwingen zu bringen. Diese Steilheit wird als *Anschwingsteilheit* bezeichnet. Je

größer die Anschwingsteilheit, um so kleiner der erforderliche Rückkopplungsfaktor. Ein größerer Außenwiderstand läßt eine kleinere Steilheit zu. Wenn nur kleine Außenwiderstände vorliegen, z. B. bei UKW, muß die Anschwingsteilheit besonders groß sein.

Aus der obenangeführten „Selbsterregungsformel" geht hervor, daß Röhren mit kleinem Durchgriff und großer Steilheit optimale Schwingungsleistungen aufweisen. Der Außenwiderstand soll groß sein, um einen hohen Spannungsabfall hervorzurufen. Das ist deshalb vorteilhaft, weil dann die für die Rückkopplung benötigte Spannung prozentual gering ist und dadurch die Schwingleistung nur unerheblich verkleinert wird.

Außer in Sender-Steuerstufen werden Oszillatorröhren zur Erzeugung der Oszillatorfrequenz in der Mischstufe des Überlagerungsempfängers verwendet. In Rundfunkempfängerschaltungen sind als Oszillatoren heute ausschließlich Trioden gebräuchlich. Gemeinsam mit einem Pentoden- oder Heptodensystem bilden sie die Bestandteile einer Mischröhre.

1.8. Die Röhre als Mischer (Mischröhre)

Als *Mischröhren* bezeichnet man solche Röhren, die zwei Wechselspannungen verschiedener Frequenzen in einen Anodenwechselstrom umformen. Im Überlagerungsempfänger sind diese Frequenzen die Eingangs-(Empfangs-)frequenz und die besonders erzeugte Oszillatorfrequenz. Das Mischprodukt enthält zwei Komponenten, die Summen- und die Differenzfrequenz der ursprünglichen Frequenzen; es stellt die Überlagerungs- oder Zwischenfrequenz dar.

Es ist zwischen multiplikativer und additiver Mischung zu unterscheiden.

Die multiplikative Mischung wird dadurch gekennzeichnet, daß man Eingangs- und Oszillatorfrequenz verschiedenen Röhrengittern zuführt. Hiermit ist eine weitgehende Entkopplung der beiden Spannungen gegeben. Für die multiplikative Mischung können nur Mehrgitterröhren verwendet werden. Die Nachteile der multiplikativen Mischung sind:

großer Rauschfaktor der Mehrgitterröhren, kleine Mischsteilheit und geringe Mischverstärkung.
Die Überlagerungs- oder Mischsteilheit ist das Verhältnis des Zwischenfrequenz-Anodenwechselstromes zur hochfrequenten Gitterwechselspannung. Eine Mischsteilheit von 775 μA/V besagt also, daß mit einer hochfrequenten Gitterwechselspannung von 1 V ein Zwischenfrequenz-Anodenstrom von 775 μA erreicht wird. Da die Mischsteilheit S_c ebenso wie der Innenwiderstand R_i einer Mischröhre von der Größe der Oszillatorspannung abhängig ist, werden in den Röhrendaten besondere Kurven angegeben. Unter Mischverstärkung versteht man die beim Mischvorgang mit einer Mischröhre erzielte Verstärkung. Sie stellt das Verhältnis der am Anodenwiderstand der Röhre vorhandenen Zwischenfrequenzspannung zu der am Steuergitter liegenden Hochfrequenzspannung dar.
Die für multiplikative Mischung heute gebräuchlichen Mischröhren sind aus der ursprünglichen Doppelsteuerröhre hervorgegangen. Es werden Hochfrequenzpentoden und besonders Mischheptoden verwendet (Bild 49). Die Überlagerungsspannung, die hier von einer besonderen Oszillator-Triode geliefert wird, kann man auch in der Mischröhre selbst erzeugen. Bei diesem *Pentagridkonverter*, der eine als Mischröhre geschaltete Heptode darstellt, werden die Katode und die ersten beiden Gitter als Triode zur Schwingungserzeugung benutzt. Die Eingangsspannung liegt am 3. Gitter. Heute sind im allgemeinen Verbundröhren gebräuchlich; in einem Röhrenkolben befindet sich ein Pentoden- bzw. Heptodensystem und ein Triodensystem (Bild 50).

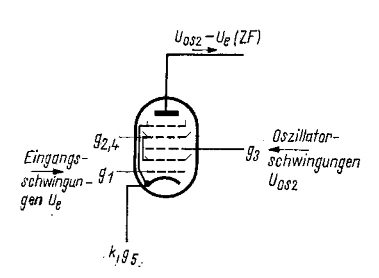


Bild 49
Prinzipschaltbild der multiplikativen Mischung mit der Mischheptode

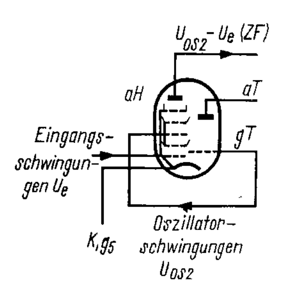


Bild 50
Prinzipschaltbild der multiplikativen Mischung mit der Triode-Heptode

Als Vorläufer der modernen Mischröhren sind die Oktoden anzusehen. In diesen kaum noch verwendeten Röhren bildet die Katode mit dem folgenden Steuergitter und einer Hilfs anode das Triodensystem.
Die Wirkungsweise der multiplikativen Mischung ist in Bild 49 erläutert: An das Gitter 1 (Steuergitter) wird die von der Antenne abgegebene Eingangsfrequenz, an das Gitter 3 (2. Steuergitter) die Oszillatorspannung angelegt. Die Gitter 2 und 4 bewirken eine Entkopplung von Eingangs- und Oszillatorspannung. Das aus beiden Spannungen gebildete Mischprodukt ist der „zwischenfrequente" Anodenwechselstrom.
Die multiplikative Mischung erfordert eine nichtlineare Strom/Spannungs-Charakteristik der Kennlinie.
Bei der additiven Mischung liegen die beiden zu mischenden hochfrequenten Spannungen am gleichen Gitter. Die Mischung erfolgt durch die Kennlinienkrümmung. Das Prinzip der additiven Mischung wird heute allgemein im Gebiet der hohen Frequenzen (UKW, Fernsehen) angewendet. Als Mischröhren dienen steile HF-Trioden, die in einer „selbstschwingenden" Mischschaltung arbeiten (Bild 51).

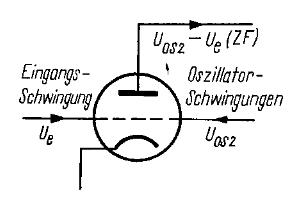


Bild 51
Prinzipschaltbild der additiven Mischung mit der Triode

Die Vorzüge der additiven Mischung bei hohen Frequenzen sind: großer Eingangswiderstand, große Mischsteilheit und somit große Mischverstärkung, Rauscharmut (bei Anwendung von Trioden) und kleine Oszillatorspannung; die kleine Oszillatorspannung ist für die Unterdrückung der Störausstrahlung wichtig.

1.9. Die Röhre als Abstimmindikator (Abstimmanzeigeröhre)

Das äußere Merkmal der Abstimmanzeigeröhre (Schaltsymbol Bild 52) ist, je nach Bauart, ein kleiner schalen-, muschel- oder flächenförmiger Leuchtschirm, den der Elektronenaufprall zum Leuchten anregt (Bild 53). Das Leuchtbild, das den Abstimmzustand des Empfangsgerätes anzeigt, wird durch die Regelspannung gesteuert. Die Regelspannung gewinnt man an einer Diodenstrecke bei der Gleichrichtung der ZF-Schwingungen. Je nach der Anordnung der Steuerorgane (ein Anzeigegitter oder die Steuerstege) wird der zum Leuchtschirm fließende Elektronenstrom mehr oder weniger stark gebündelt. Es werden somit kleinere oder größere Flächen, deren Gestalt von der Bauart des Leuchtschirmes, der Anordnung und Form der Steuerorgane abhängt, zum Leuchten gebracht. Die Bilder 54 und 55 geben die Leuchtbilder für die beiden gebräuchlichsten Anzeigeröhren wieder.
Die dem Triodengitter zugeführte Steuerspannung ist von der Größe der dem Demodulator zugeführten Hochfrequenz, also von der Trägerwellenamplitude des empfangenen Senders, abhängig. Auf diese Weise ergibt sich der größte Leuchtwinkel

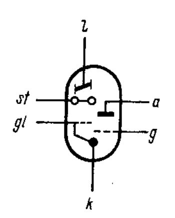


Bild 52
Schaltsymbol der Abstimmanzeige-Röhre (EM 84)

Bild 53 Abstimmanzeige-Röhre

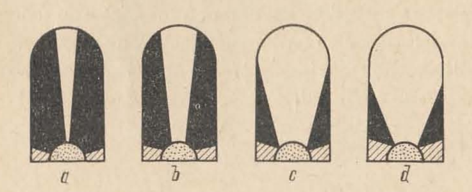


Bild 54 Leuchtbilder der Abstimmanzeige-Röhre EM 80

a) Nicht auf die Trägerwelle des Senders abgestimmt oder geringe Feldstärke des Senders
b) Unvollkommene Abstimmung oder mäßige Feldstärke
c) Nur annähernd auf die Trägerwelle abgestimmt, bei großer Feldstärke
d) Einwandfreie Abstimmung bei sehr großer Feldstärke

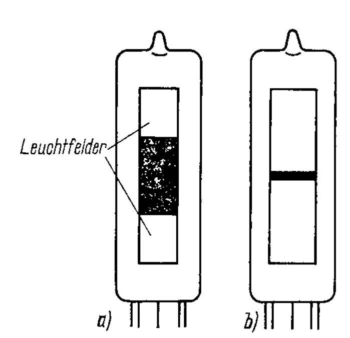


Bild 55
Leuchtbilder der Abstimm-anzeige-Röhre EM 84
a) wie b) zu Bild 54
b) wie d) zu Bild 54

oder die größte Leuchtfläche bzw. der geringste Balkenabstand, wenn man den Empfänger genau auf die Trägerwelle des Senders abgestimmt hat.
Abstimmanzeigeröhren müssen vor der Einwirkung von Magnetfeldern geschützt werden, da diese Verzerrungen des Leuchtbildes hervorrufen.

1.10. Störerscheinungen an Elektronenröhren

In einer funktechnischen Schaltung können auch Elektronenröhren Störungen verursachen und damit die Funktion des Gerätes beeinträchtigen. Die an Röhren auftretenden Störerscheinungen sind mannigfaltig, ihre Ursachen und Auswirkungen unterschiedlich. Störungen entstehen durch:

die einer Röhre grundsätzlich anhaftenden Unvollkommenheiten,
unsachgemäßen Betrieb der Röhren, z. B. Nichtbeachtung der Betriebsdaten, unrichtige Verwendung u. a. m.,
mechanische Überbeanspruchung, z. B. Entstehen von Haarrissen im Kolben etwa durch Deformierung der Stifte,
Alterung,
Fabrikationsfehler.

Die wesentlichen Störeffekte und ihre Ursachen

Brummen (bei Wechselstromheizung)

a) Emissionsschwankungen als Folge von Temperaturschwan-

kungen des Heizfadens bei *direkt* geheizten Röhren. Die Brummfrequenz beträgt meist 100 Hz. Bei indirekt geheizten Röhren kommt dieses Brummen nicht vor (zu große Wärmeträgheit der Katode).

b) Bei mangelhafter Heizfadenisolation Auftreten eines Wechselstromes zwischen Heizfaden und Katode (Isolationsbrummen).

c) Schädliche Kapazitäten zwischen Gitter oder Anode und Heizfaden (statisches Gitter- oder Anodenbrummen).

d) Induktive Beeinflussung von Röhrenelektroden durch ihre Gegeninduktivität gegenüber den Heizfadenzuleitungen (Induktionsbrummen).

e) Wirkung des Magnetfeldes des Heizfadens auf die Elektronenbahnen (magnetisches Brummen).

Rauschen (bei großen Verstärkungen)

a) Schroteffekt, beruht auf unregelmäßigem Austritt von Elektronen aus der Katode; es entstehen Anodenstromschwankungen.

b) Funkeleffekt, verursacht durch unregelmäßige, spontane Änderungen der örtlichen Austrittsarbeiten der Katodenoberfläche bei Oxidkatodenröhren. Die Erscheinung kommt besonders bei unterheizter Katode vor.

c) Isolationsrauschen, durch Isolationsfehler im Röhrensystem hervorgerufen.

d) Gasionenrauschen, durch Aufprall von Elektronen auf Gasmoleküle entstandene Ionen, die mit ihrer positiven Ladung von Elektroden mit negativem Potential (z. B. Steuergitter) aufgenommen werden.

e) Stromverteilungsrauschen, das bei Mehrgitterröhren durch die zeitlich schwankende Verteilung der Ströme zu den einzelnen positiv vorgespannten Elektroden verursacht wird.

Klingen

Diese Erscheinung ist auf mechanische Erschütterungen zurückzuführen. Die Systemteile (besonders Gitter und Katode) werden im Rhythmus der mechanischen Erschütterungen verlagert. Entsprechend den Eigenschwingungen dieser Röhren-

teile ändern sich die Röhrenkennwerte sowie der Anodenstrom, und es werden niederfrequente Schwingungen erzeugt. Klingen kann sowohl bei HF- als auch bei NF-Röhren auftreten. Bei ersteren wirkt sich der Effekt nur bei Vorhandensein eines hochfrequenten Trägers aus, der durch die entstehenden NF-Schwingungen moduliert wird. Am stärksten äußern sich Klingerscheinungen an NF-Verstärkerröhren, da hier die Klingspannung die größte Nachverstärkung erfährt.

Krachen

Krachen entsteht durch erschütterungsabhängige Stromunterbrechungen oder Kurzschlüsse.

Mangelhaftes Vakuum

Das äußere Merkmal des schlechten Vakuums ist eine bläuliche Leuchterscheinung. Die Röhre wird unstabil. Unregelmäßige Elektronenbewegung kann Störgeräusche hervorrufen.

Emissionsrückgang

Die allmähliche Abnahme der Emission stellt eine natürliche Erscheinung dar, die im Emissionsmechanismus der Katode begründet ist. Frühzeitiges Nachlassen der Emission wird durch Unter- und Überheizung der Katode hervorgerufen.

Wandladungseffekt

Diese Erscheinung wird durch Sekundär- oder Streuelektronen, die auf die Kolbeninnenwand auftreffen, hervorgerufen. Es bilden sich elektrostatische Störfelder aus. Sie beeinflussen den Elektronenstrom. Der Wandladungseffekt äußert sich in stoßweisen Lautstärkeunterschieden beim Empfang.

1.11. Erläuterungen zu den technischen Daten von Empfängerröhren

Die in den Röhrentabellen angegebenen technischen Daten lassen sich in drei Gruppen einteilen:

a) statische Werte (Kennwerte),
b) Betriebswerte,
c) Grenzwerte.

Unter den *statischen* Werten oder *Kennwerten* sind die Eigenschaften der Röhre ohne zusätzliche Schaltelemente zu verstehen. Sie stellen Mittelwerte von fabrikneuen Röhren dar.

Die *Betriebswerte* geben die günstigsten Einstelldaten der Röhren für das jeweils genannte Anwendungsgebiet an. Die als Einstellwerte geltenden Daten werden meistens fett gedruckt. Gewöhnlich sind die Betriebswerte auf den Anodenstrom als Einstellwert bezogen. Die Gitterspannung ist so einzustellen, daß der angegebene Anodenstrom fließt.
Die *Grenzwerte* geben die beim Betrieb der Röhre höchstzulässigen Spannungs-, Strom- und Belastungswerte u. a. m. an. Sie sind genau einzuhalten, da sonst die Eigenschaften und die Lebensdauer der Röhre beeinträchtigt werden.

Heizwerte

Die Spannungswerte beziehen sich bei indirekt geheizten Röhren auf die Katode, bei direkt geheizten auf das negative Heizfadenende.
Da die Katode aus physikalisch bedingten Gründen nur innerhalb eines engbegrenzten Temperaturbereiches ordnungsgemäß arbeitet, müssen die vorgeschriebenen Heizwerte unbedingt eingehalten werden. Die durch Netzspannungsschwankungen und Schaltmittelstreuungen verursachten Abweichungen vom Nennwert dürfen kurzzeitig folgende maximalen Werte annehmen:

Parallelheizung ± 10%,
Serienheizung ± 6%.

Bei Batterieröhren der D-Serie (Nennspannung 1,4 V) darf die Heizspannung maximal 1,5 V und minimal 1,1 V betragen.

Statische Werte

Die statischen Werte geben die Mittelwerte der Kenndaten einer idealen Röhre („Konstruktionsröhre“) an, gemessen bei den genannten Einstellwerten und dem Außenwiderstand gleich Null. Da die Mittelwerte den unvermeidlichen Fabrikationsstreuungen unterworfen sind, wird die Streubreite der wichtigsten Kenndaten in den Abnahmebedingungen festgelegt.

Betriebswerte (dynamische Werte)

Die Betriebswerte stellen Beispiele für die günstigste Dimensionierung von Schaltungen dar.
Folgende Hinweise sollen zur Beurteilung der Betriebswerte in den Tabellen dienen:

Die Gleichspannungen $U_{g1} \ldots U_{g4}$ und U_a bedeuten die zwischen der betreffenden Elektrode und der Katode bzw. dem negativen Heizfadenende wirksame Spannung. Liegen in den Elektrodenzuleitungen Schaltmittel, so hängt die in der Röhre wirksame Gleichspannung vom jeweiligen Elektrodenstrom und vom Gleichstromwiderstand des Schaltmittels ab. In dem Fall ist die Betriebsspannung U_b angegeben.
Bei einer Röhre, die mit einer Gitterwechselspannung $U_g \sim$ ausgesteuert wird, entstehen je nach Art des Außenwiderstandes Wechselströme oder Wechselspannungen. Diese sind den Gleichströmen bzw. Gleichspannungen überlagert und können zu deren Ansteigen oder Absinken führen. So steigt zum Beispiel bei Endröhren der Schirmgitterstrom an und damit findet eine Schirmgitterbelastung statt. Daher wird für den Fall der Aussteuerung der dynamische Grenzwert der Schirmgitterbelastung angegeben; die Überschreitung des Grenzwertes muß durch einen Schirmgittervorwiderstand verhindert werden.
Die statische Steilheit S sinkt im Betrieb auf den geringeren Wert S_A (Arbeitssteilheit) ab. Dieser Wert wird vom Außenwiderstand R_a des Anodenkreises und dem Röhreninnenwiderstand R_i bestimmt.
Ein wesentlicher Kennwert der Mischröhre ist die Mischsteilheit, auch Konversionssteilheit S_c genannt. Sie stellt das Verhältnis des ZF-Anodenwechselstromes zur HF-Gitterwechselspannung dar.
Die Spannungsverstärkung v ist von den Einstellwerten und dem Außenwiderstand abhängig. Für Trioden wird an Stelle von v der Verstärkungsfaktor μ $\left(\mu = \frac{1}{D}\right)$ angegeben.

Bei Endröhren ist die im Anodenstromkreis erzielbare Ausgangsleistung $P \sim$ der wichtigste dynamische Kennwert. Sie

wird bei einem Klirrfaktor k von 5% (bei Trioden) bzw. 10% (bei Pentoden) gemessen. P ~ hängt von den Einstellwerten und vom Außenwiderstand ab. Der Klirrfaktor gibt den Prozentsatz des Oberwellengemisches an, das im Anodenwechselstrom enthalten ist. Es entsteht durch die Kennlinienkrümmung. Die Angaben für P ~ und k werden auf eine Meßfrequenz von 800 Hz bezogen.

Grenzwerte

Mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit und die Lebensdauer der Röhren dürfen die Grenzwerte im Betrieb keinesfalls überschritten werden. Eine Überschreitung *einzelner* Strom-, Spannungs- oder Leistungsgrenzwerte soll auch dann nicht erfolgen, wenn die Röhre mit den *anderen* unterhalb der zugelassenen Maximalgrenze liegt.
Die bei Gleichrichterröhren angegebenen Mindestwerte für den Schutzwiderstand $R_{v\,min}$ müssen besonders beachtet werden. Der Widerstand soll das „Spratzen" der Röhre (Überschläge zwischen Anode und Katode) verhindern.

1.12. Hinweise für den Einbau von Röhren

Grundsätzlich können die Röhren in beliebiger Lage eingebaut werden. Jedoch sollte man, um die Klingneigung zu verringern, die senkrechte Lage bevorzugen.
Direkt geheizte Röhren und auch indirekt geheizte Endröhren sind bei horizontalem Einbau so anzuordnen, daß die Heizfäden in einer senkrechten Ebene liegen bzw. die große Achse der Gitter senkrecht steht. Für Noval- oder Miniatur-Röhrenfassungen ist folgendes zu beachten: Die nach dem Sockelschaltbild mit „i. V." (innere Verbindung) gekennzeichneten Elektroden dürfen keinesfalls beschaltet werden; es empfiehlt sich auch, freie Sockelstifte bzw. die entsprechenden Kontakte der Fassungen von der Beschaltung auszuschließen.
Die Verdrahtung der Kontakte ist so durchzuführen, daß die Beweglichkeit der Fassungsfedern nicht beeinträchtigt wird. Auf die Röhrenstifte dürfen keine Querkräfte einwirken, um Glassprünge des Kolbens zu verhindern. Die Röhre darf nur

senkrecht in die Fassung eingeführt oder herausgezogen werden. Ein Verbiegen der Stifte ist zu vermeiden.
Bei Subminiaturröhren müssen die Lötstellen an den Anschlußdrähten mindestens 5 mm, die Biegestellen mindestens 1,5 mm von der Glasdurchführung entfernt sein. Beim Löten ist auf Wärmeabfuhr zu achten.

1.13. Die Kurzzeichen für die Elektrodenanschlüsse

Die in die Sockelschaltbilder eingezeichneten Kurzbezeichnungen haben folgende Bedeutung:

a	Anode
d	Diodenanode
f	Heizfaden
+ f	positiver Heizfadenanschluß
— f	negativer Heizfadenanschluß
fM	Heizfadenmitte
g	Steuergitter bei Trioden
g1	Steuergitter bei Mehrgitterröhren
g2	Schirmgitter
g3 ... 5	Gitter 3 ... 5
gl	Gitter des Leuchtsystems
i. V.	innere Verbindung
k	Katode
l	Leuchtschirm
m	äußere Abschirmung
s	Abschirmung im Inneren der Röhre
st	Steuerstege

Mehrere Gitter desselben Röhrensystems werden in der Reihenfolge Katode zu Anode durch arabische Ziffern als Indizes gekennzeichnet. Bei Verbundröhren mit gleichwertigen Systemen erhalten die Elektroden der einzelnen Systeme römische Ziffern (z. B. ECC aI, aII).
Die Elektroden der einzelnen Systeme bei Verbundröhren mit unterschiedlichen Systemen (z. B. ECH 81) werden durch beigefügte Großbuchstaben bezeichnet. Es bedeuten:

H	Heptode	T	Triode	P	Pentode

1.14. Die Typenbezeichnung der Empfängerröhren

Europäische Rundfunkröhren werden durch zwei oder mehrere Großbuchstaben mit nachfolgender ein- oder mehrstelliger Ziffer gekennzeichnet. Röhren mit gleicher Typenbezeichnung sind unabhängig vom Hersteller untereinander austauschbar, da sie gleiche elektrische Daten innerhalb der üblichen Toleranzen und die gleiche Sockelschaltung haben.
Die Röhrentypenbezeichnung läßt in Verbindung mit dem Röhrentypenschlüssel Angaben über Heizspannung und Heizstrom, die Stromart der Heizung, den Systemaufbau, die Beschaffenheit und den Verwendungszweck der Röhre zu. Der im folgenden auszugsweise wiedergegebene Schlüssel beschränkt sich auf die modernen Röhrentypen. Der vollständige Typenschlüssel, der alle seit 1934 gefertigten Röhren berücksichtigt, ist in der Broschürenreihe „Der praktische Funkamateur", Heft 10, abgedruckt.

1.14.1. Der Röhrentypenschlüssel

Der erste Buchstabe der Typenbezeichnung kennzeichnet die Heizdaten.

Einzustellender Heizwert Heizspannung Uf oder Heizstrom If	Heizartenkennzeichnung Parallelheizung (p), Serienheizung (s), direkt (d) und indirekt (i), Wechselstrom- (W) oder Gleichstromheizung (G) (Batterie oder gleichgerichteter Wechselstrom)		
D Uf = 1,4 V; 1,25 V 1,2 V; 0,625 V	p; s;	d	G
E Uf = 6,3 V	p;	i	W, (G)
(If = 150 ... 300 mA)	(s);	i	W, (G)
P If = 300 mA	s;	i	G, W
U If = 100 mA	s;	i	G, W

Der an zweiter Stelle stehende Buchstabe der Typenbezeichnung gibt Aufschluß über den Systemaufbau und zugleich über die Anwendungsmöglichkeit der Röhre im Empfänger.

Erscheint in der Typenbezeichnung an dritter und gegebenenfalls an vierter Stelle ein weiterer Buchstabe, so enthält die Röhre ein oder zwei weitere, dem Kennbuchstaben entsprechende Elektrodensysteme. Es handelt sich dann um eine Doppelröhre mit getrennten Katoden (ECC 85) oder um eine Verbundröhre mit gemeinsamer Katode für beide Systeme (ECL 82).

Buchstabe	Röhrentyp	Anwendung	Beispiel
A	Diode	HF-Gleichrichtung, Regelspannungserzeugung	DAF 96
B	Duodiode	HF-Gleichrichtung, Regelspannungserzeugung	EBF 80
C	Triode	HF-, NF-Verstärkung, Schwingungserzeugung, Empfangsgleichrichtung mit Verstärkung, Mischverstärkung	ECC 85, ECL 82
F	Pentode	HF-, ZF-, NF-Verstärkung (regelbar), Empfangsgleichrichtung mit Verstärkung	EF 85
H	Heptode	HF-Verstärkung, regelbar, Mischverstärkung, regelbar	ECH 81
K	Heptode	Mischverstärkung, regelbar, mit Schwingungserzeugung	DK 96
L	Endpentode	Endverstärkung (Lautsprecherröhre)	DL 94 ECL 82
M	Magisches Auge	Abstimmanzeige	EM 80
Y	Einweggleichrichter	Gleichrichtung der Netzwechselspannung, Hochspannungsgleichrichter	UY 85 EYY 13
Z	Zweiweggleichrichter	Gleichrichtung der Netzwechselspannung	EZ 81

Die Kennzahl hinter den Großbuchstaben kennzeichnet den Systemaufbau oder die Sockelung oder eine spezielle Type.

20 ... 49 Röhren mit Oktal-, Loktal- oder Rimlocksockel

50 ... 60 Spezialröhren mit verschiedener Aufbautechnik und Sockelung

61 ... 79 Subminiaturröhren mit verschiedenen Sockelarten oder Lötdrähten

80 ... 89	9-Stift-Miniatur-(Noval-)Röhren (Preßtellerröhren)
90 ... 99	7-Stift-Miniaturröhren (Preßtellerröhren)
100 ... 999	Spezialröhren mit verschiedener Aufbautechnik und verschiedenen Sockelarten

1.15. Standardisierung

Für Empfängerröhren (Anodenverlustleistung bis 25 Watt) sind folgende *DDR-Standards* gültig:

Technische Güte- und Lieferbedingungen

Kurzzeichen	TGL 9240
Übersicht über Empfängerröhren	TGL 9624
Hauptkennwerte der Empfängerröhren	TGL 9625 bis 9687, 10461, 10462, 10465, 10831, 10832, 12121, 13152, 13153, 15215, 16882
Begriffe	TGL 9664
Außenmaße (Nenngrößen)	TGL 0-41537, 0-41539

Fachbereich-Standards sind:

Meß- und Prüfverfahren	TGL 70-50, 70-54, 70-100
Hauptkennwerte (D-Röhren)	TGL 70-173 bis 70-175

2. Die Spannungs-Stabilisatorröhre

Spannungs-Stabilisatorröhren dienen in der Hauptsache zur selbsttätigen und trägheitslosen Konstanthaltung von Gleichspannungen oder zur Glättung von Spannungsschwankungen. Darum werden diese Röhren auch vom Amateur häufig verwendet.

Das zur Gruppe der Ionenröhren gehörige Bauelement (Schaltsymbol Bild 56) besitzt zwei Elektroden, *Katode* und *Anode*, die in einem gasgefüllten Glaskörper eingeschmolzen sind. Als *Gasfüllung* ($^1/_{10}$ bis $^1/_{100}$ Torr) dienen Edelgase. Im Äußeren ähneln moderne Typen den Miniatur-Elektronenröhren und haben wie diese den 7-Stift-Sockel (Bild 57). Das Bild 58 zeigt ein älteres Muster.

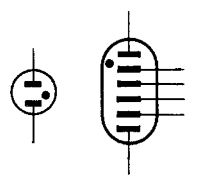


Bild 56
Schaltsymbole der Spannungs-Stabilisatorröhre und des Glimmstrecken-Spannungsteilers

Spannungs-Stabilisatorröhren werden nicht geheizt, arbeiten also mit *kalter* Katode. Diese besteht aus Reinmetall, meist Molybdän. Einige Typen haben noch eine Hilfselektrode, die Zündelektrode. Während verschiedene Typen älterer Fertigung mit mehreren Glimmstrecken versehen waren, arbeiten die modernen Röhren nur mit *einer* Glimmstrecke.

Die *Wirkungsweise* der Stabilisatorröhre besteht darin, daß beim Anlegen einer Spannung in der Röhre eine *Gasentladung* hervorgerufen wird. Es fließt dann ein Strom von der einen Elektrode zur anderen. Die Spannung, bei der die Entladung ausgelöst wird, ist die *Zündspannung* U_Z. Unmittelbar nach dem Einsatz der Zündung genügt eine geringere Spannung,

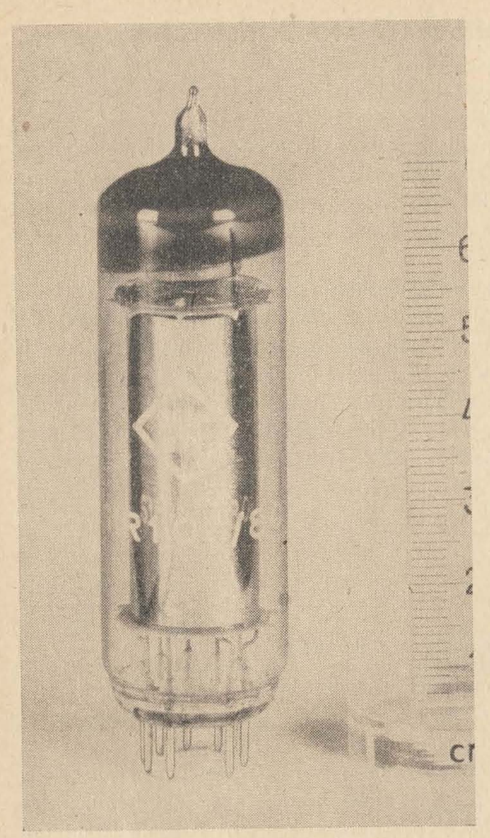


Bild 57 Spannungs-Stabilisatorröhre in Miniaturausführung

um die Entladung und den Stromfluß aufrechtzuerhalten; diese Spannung bezeichnet man als *Brennspannung* U_B. Eine weitere Herabsetzung der Spannung führt zum Erlöschen der Entladung; die zugehörige Spannung ist die *Löschspannung* U_L. Zwischen Zünd-, Brenn- und Löschspannung besteht die Beziehung $U_Z > U_B > U_L$. Diese Spannungen und der höchstzulässige Strom (maximale Belastung) charakterisieren die

Spannungs-Stabilisatorröhre. Für den Betrieb sind ferner von Bedeutung: die für die Größe der Stabilisierung maßgebliche Strombegrenzung, also die untere und obere Grenze des durch die Röhre fließenden *mittleren Querstromes* I_{min} und I_{max} (auf diesen ist die Röhre einzustellen), sowie der sogenannte *Wechselstrom-Innenwiderstand* $R_i \sim$. Durch diesen Widerstand, dessen Größe außer von der Konstruktion der Röhre, vom Gasdruck abhängig ist, kann die Güte für die Stabilisierung ausgedrückt werden. $R_i \sim$ wird definiert durch die Gleichung

$$R_i \sim = \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B} = \frac{\Delta U_B}{I_{B\,max} - I_{B\,min}} .$$

Je kleiner der Widerstand, desto größer der Stabilisierungseffekt. Der Röhren-Innenwiderstand ist in den Röhrendaten angegeben; er liegt je nach der Type zwischen 100 und 1000 Ω.

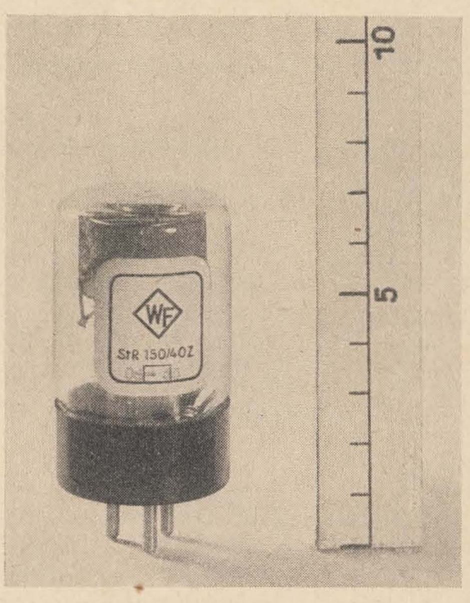


Bild 58 Ältere Spannungs-Stabilisatorröhre

2.1. Das Prinzip der Stabilisierungsschaltung

In der Stabilisierungsschaltung (Prinzip in Bild 59) sind die Elektroden parallel zum Verbraucher angeschlossen. Der Röhre wird über den Vorwiderstand R_V, dem die Strombegrenzung obliegt, die *Speisespannung* U_N (Gleichstrom-Netzspannung, gleichgerichtete Wechselspannung) zugeführt. An dem Lastwiderstand R_L (Verbraucher) liegt die stabilisierte Spannung, die *Brennspannung* U_B, an.

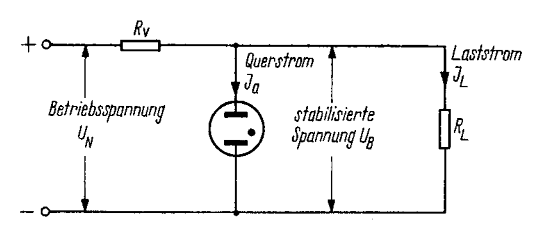


Bild 59 Prinzipschaltung der Spannungs-Stabilisatorröhre

2.2. Die Kennlinie und der Vorwiderstand R_v

Die Grundlage für die Schaltungsdimensionierung bilden die Kenndaten der Röhre in Verbindung mit der Röhren-Kennlinie. Diese ist im Bild 60 wiedergegeben und zeigt folgendes: Schwankt die Speisespannung U_N um einen bestimmten Wert ΔU_N, dann ändert sich auch der durch den Widerstand fließende Strom. Von der richtigen Dimensionierung dieses Widerstandes hängt die Funktion der Schaltung ab.

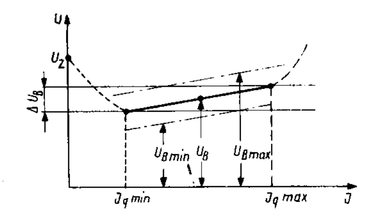


Bild 60
Die Spannungs/Strom-Kennlinie der Spannungs-Stabilisatorröhre

Den Betriebsbedingungen entsprechend ist R_V so zu bemessen, daß der entstehende Spannungsabfall mindestens der halben Brennspannung entspricht: $U_{RV} \geqq \frac{\Delta U_B}{2}$. Danach müßte R_V einen sehr großen Wert haben. Nun muß man aber berücksichtigen, daß der vorgeschriebene minimale Querstrom $I_{q\,min}$ bei voller Belastung durch den Verbraucher nicht unterschritten werden darf: Hiermit ist einem extrem großen Widerstandswert eine Grenze gesetzt, denn er würde zum Verlöschen der Röhre führen. Es muß daher

$$R_V < \frac{U_{N\,min} - U_{B\,max}}{I_{q\,min} + I_{L\,max}} \tag{1}$$

sein; $U_{N\,min}$ = Mindestbetriebsspannung, $U_{B\,max}$ = maximale Brennspannung (obere Grenze des für die Brennspannung unvermeidlichen Streubereiches), $I_{q\,min}$ = minimaler Querstrom, $I_{L\,max}$ = maximaler Verbraucherstrom.

Eine zweite Grenze für R_V ist dadurch gegeben, daß die Zündung der Glimmstrecke gewährleistet sein muß. Es gilt hierfür:

$$R_V \leqq \left(\frac{U_{N\,min}}{U_{z\,max}}\right) - 1 \cdot R_L; \tag{2}$$

$U_{z\,max}$ = maximale Zündspannung der Röhre, R_L = Verbraucherwiderstand. Die Bedingung (2) ergibt für die Praxis einen geringeren Grenzwert für R_V als die Bedingung (1). Das bedeutet Verzicht auf eine bessere Glättung zugunsten besserer Zündbedingungen.

Schließlich ist bei der Berechnung von R_V noch der maximal zulässige Querstrom $I_{q\,max}$ der Glimmstrecke zu berücksichtigen. Damit wird ein bestimmter Mindestwert für R_V verlangt, der aus folgender Bedingung hervorgeht:

$$R_V > \frac{U_{N\,max} - U_{B\,min}}{I_{q\,max} + I_{L\,min}}; \tag{3}$$

$U_{B\,min}$ = untere Grenze des für die Brennspannung unvermeidlichen Streubereiches.

Zusammenfassend kann gesagt werden: R_V nach (1) sichert den minimalen Querstrom für die Glimmstrecke und R_V nach

(2) die Zündung der Strecke. R_V nach (3) ist der Mindestwert, der die Glimmstrecke vor Überlastung schützt. In der Praxis wird mit einem Mittelwert aus (1), (2) und (3) gearbeitet. Die Speisespannung soll so groß sein, daß an R_V mindestens die halbe Spannung der Glimmstrecke steht:

$$U_N \geqq \frac{3}{2} \cdot U_B .$$

Die stabilisierende Wirkung der Röhre ist um so größer, je flacher der horizontale Teil der Kennlinie verläuft; er kann als geradlinig angesehen werden (Bild 61). In diesem dem Brennstrombereich entsprechenden Teil rufen schon geringste Spannungsschwankungen des Speisestromes starke Änderungen des durch die Röhre fließenden Stromes hervor. Sie erzeugen am Vorwiderstand unterschiedliche Spannungsabfälle, so daß die Spannung an der Röhre und somit auch am Verbraucher nahezu konstantbleibt. Eine Stabilisierung findet nicht mehr statt, wenn die Röhre außerhalb des geradlinigen Teiles der Kennlinie arbeitet. Das Bild 62 zeigt eine mit einer Spannungs-Stabilisatorröhre geglättete Spannung.

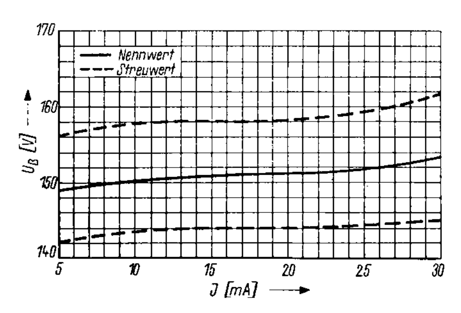


Bild 61 Der Brennstrom I_B als Funktion der Brennspannung U_B

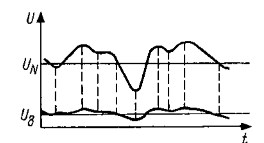


Bild 62
Beispiel für die Wirkungsweise der Spannungs-Stabilisierung

Natürlich interessiert auch die zahlenmäßige *Größe der Stabilisierung.* Mit hinreichender Genauigkeit kann sie nach der folgenden (vereinfachten) Formel durchgeführt werden:

$$\pm \Delta U_B \approx \pm \Delta U_N \cdot \frac{R_{i\sim}}{R_V};$$

U_B = mittlere Brennspannung der Röhre (stabilisierte Spannung), U_N = Speisespannung (zu stabilisierende Spannung), R_i = Wechselstrom-Innenwiderstand der Röhre, R_V = Vorwiderstand.

2.3. Der Zündwiderstand R_z

Im ungezündeten Zustand der Stabilisatorröhre liegt die volle Betriebsspannung am Verbraucher. Soll das vermieden werden, dann muß man Typen mit einer Zündelektrode verwenden. Diese erhält ihre Spannung über einen Vorwiderstand, den *Zündwiderstand.* Er ist so zu dimensionieren, daß die Zündspannung um einen geringeren Wert größer ist als die Brennspannung. Meist wird die Zündelektrode über einen Widerstand von 1 MΩ an die Spannungsquelle angeschlossen.

2.4. Schaltungsbeispiel für Spannungs-Stabilisatorröhren

Die einfachste Schaltung entspricht der in Bild 59 wiedergegebenen Grundschaltung. Wenn eine Röhre mit Zündelektrode verwendet wird, ist dieser der Zündwiderstand R_Z vorzuschalten. (Die früher gebräuchlichen Röhren mit 4 Entladungsstrecken, als Spannungsteiler-Stabilisatoren bezeichnet, werden in der Deutschen Demokratischen Republik und auch in Westdeutschland für eine Erstbestückung nicht mehr hergestellt; für Ersatzzwecke sind die Typen StR 280/40 und 280/80 noch lieferbar.)
Mit den modernen Stabilisatorröhren, insbesondere der Miniaturausführung, lassen sich sowohl entsprechende Spannungsteilerschaltungen als auch Serien-, Parallel- und Kaskadenschaltungen zweckmäßig ausführen.

Um hohe geglättete Spannungen zu erhalten, werden die Röhren in Reihe geschaltet (Bild 63). Die entnehmbare Spannung U_B entspricht dann der Summe der Brennspannungen, die die einzelnen Röhren liefern. Der Innenwiderstand der Reihenschaltung ist analog der Summe der Einzel-Innenwiderstände. Außer der Gesamtspannung können der Reihenschaltung auch Teilspannungen durch Abgriffe zwischen den in Reihe liegenden Röhren entnommen werden.

Ergeben sich in einer Stabilisierungsschaltung größere Querströme als zulässig, empfiehlt sich eine Parallelschaltung (Bild 64). Auch bei der Steigerung des Verbraucherstromes

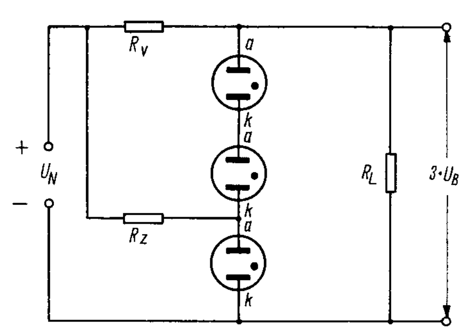


Bild 63 Serienschaltung von Spannungs-Stabilisatorröhren

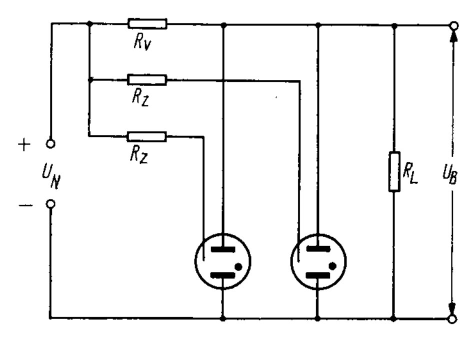


Bild 64 Parallelschaltung von Spannungs-Stabilisatorröhren

auf Werte, die größer sind als der zulässige Querstrom, ist die Parallelschaltung erforderlich. Damit wird der Innenwiderstand herabgesetzt und die Stabilisierung verbessert. Soll die stabilisierende Wirkung vervielfacht werden (Mehrfachstabilisierung), ist die Schaltung nach Bild 65 zu wählen. Die in Reihe geschalteten Röhren S_1 und S_2 liefern die einfach geglättete Spannung; an der Röhre S_3 wird die doppelt geglättete Spannung abgenommen.

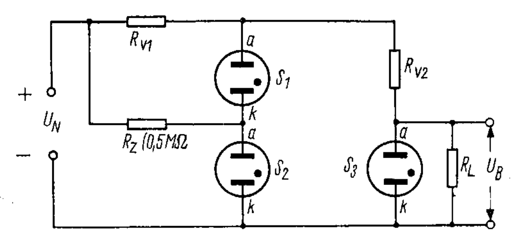


Bild 65 Kaskadenschaltung von Spannungs-Stabilisatorröhren

Bei der Reihenschaltung von Stabilisatorröhren ist es nicht erforderlich, jede Zündelektrode anzuschließen; bereits ein Widerstand genügt, um die Zündfolge der einzelnen Röhren zu regeln.

2.5. Betriebsbedingungen und Hinweise für die Anwendung der Spannungs-Stabilisatorröhren

Für die Anwendung von Spannungs-Stabilisatorröhren sollten die folgenden Hinweise und Regeln genau beachtet werden, um sowohl einen optimalen Wirkungsgrad der Stabilisierung zu erzielen, als auch die Röhre vor einer Zerstörung oder einer Leistungsminderung zu bewahren.

— Die Röhre wird mit *positiver Spannung an der Anode* betrieben, andernfalls verschlechtern sich die Regeleigenschaften der Röhre beträchtlich. Im Schaltzeichen der

Röhre ist die *Katode* mit dem ihr unmittelbar benachbarten *„Punkt“* bestimmt. Das Sockelschaltbild der 7-Stift-Miniaturausführung zeigt Bild 66.

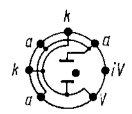


Bild 66
Sockelschaltbild einer Spannungs-Stabilisatorröhre des Miniaturtypes

— Die Betriebs-(Speise-)Spannung U_N muß größer als die Zündspannung U_Z sein.

— Es darf kein höherer Strom durch die Röhre fließen als der in den Röhrendaten angegebene maximale Strom. Der bei Überlastung auftretende Lichtbogen zerstört die Stabilisatorröhre.

— Der vorgeschriebene minimale Querstrom $I_{q\,min}$ darf bei voller Belastung durch den Verbraucher nicht unterschritten werden, da sonst eine einwandfreie Stabilisierung nicht mehr gewährleistet ist.

— Der Vorwiderstand R_V ist so zu bemessen, daß der hervorgerufene Spannungsabfall mindestens der halben Brennspannung U_B — bei Serienschaltungen der jeweiligen halben Summenbrennspannung — entspricht.

— Stabilisatorröhren erreichen je nach Typ erst nach 3 bis 15 min Betriebszeit stabile Werte.

— Die maximale Spannungskonstanz ist zu erreichen, wenn die Röhre mit konstantem Querstrom betrieben wird. Das setzt voraus, daß sie im geradlinigen Teil der Kennlinie arbeitet.

— Die Grenzwerte dürfen mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit und die Lebensdauer der Röhre nicht überschritten werden.

— Wenn eine genaue Brennspannung gewährleistet sein soll,

müssen Spannungs-Stabilisatorröhren im Betrieb vor Lichteinwirkungen geschützt werden.
Röhren, die lange Zeit im Dunkeln aufbewahrt worden sind, zünden häufig anfangs schwer.

— Freie Stifte der Röhre dürfen nicht beschaltet bzw. nicht als „Stützpunkt“ verwendet werden. Im Sockelschaltbild sind diese Stifte mit „i. V.“ bezeichnet.

— Spannungs-Stabilisatorröhren müssen vor Erschütterungen (Druck, Stoß, Schlag usw.) bewahrt werden.

2.6. Die Typenbezeichnung der Spannungs-Stabilisatorröhren

Die auf dem Röhrenkolben angebrachte Bezeichnung hat folgende Bedeutung:

Röhren des VEB Werk für Fernsehelektronik, Berlin

„StR“ ist die Abkürzung für Stabilisatorröhre. Die erste Zahl gibt die Spannung zwischen den beiden Elektroden in Volt an; die Zahl hinter dem Schrägstrich kennzeichnet den maximalen Querstrom in Milliampere. Der bei einigen Typen angefügte Zusatz „z“ besagt, daß die Röhre eine Zündelektrode besitzt.

Röhren der Deutschen Glimmlampengesellschaft Pressler, Leipzig

„GR“ ist die Abkürzung für Glättungsröhre; die folgenden beiden Zahlengruppen haben keine Beziehung zu den Betriebsdaten.

2.7. Standardisierung

Für Spannungs-Stabilisatorröhren gelten folgende *DDR-Standards*:

Hauptkennwerte	TGL 11526 bis 11529, 11615, 14024, 16758
Nenngrößen	TGL 0-41537, 0-41539.

2.8. Spannungs-Stabilisatorröhren der Deutschen Demokratischen Republik

Röhren des VEB Werk für Fernsehelektronik, Berlin-Oberschöneweide

Typ	entspricht	Zünd-spannung U_Z [V] ≦	Mittlere Brenn-spannung U_B [V]	Mittlerer Querstrom I_q [mA]	Regelbereich I_q min ... I_q max [mA]	Innenwiderstand R_i ~ [Ω]
StR 75/60	75 C 1	116	78	30	2 ... 60	100
85/10	STV 85/10, 85 A 2, OG 3	125	85	6	1 ... 10	250
90/40	90 C 1	125	90	20	1 ... 40	300
100/80		150	101	45	5 ... 80	20
108/30	STV 108/30, 108 C 1, OB 2	127	108	17,5	5 ... 30	100
150/15	150 B 2, 6354, QS 1200	180	150	10	5 ... 15	250
150/30	STV 150/30, 150 C 2, OA 2	180	150	17,5	5 ... 30	100

Veraltete Typen bzw. Ersatzbestückung:

Typ	entspricht	U_Z [V] ≦	U_B [V]	I_q [mA]	I_q min ... I_q max [mA]	R_i ~ [Ω]
StR 70/6	STV 70/6	100	78	4,5	3,5 ... 6	
100/402	STV 100/402	150/180	101	30	10 ... 40	80
150/120	STV 150/120	220	150	15	10 ... 20	300
150/402		220	145	30	10 ... 40	150
280/40	STV 280/40	500	285	30	10 ... 40	280
280/80	STV 280/80	500	285	40	10 ... 80	200

Röhren der Deutschen Glimmlampen-Gesellschaft, Leipzig

Typ	entspricht	Zünd-spannung U_Z [V] ≦	Mittlere Brenn-spannung U_B [V]	Mittlerer Querstrom I_q [mA]	Regelbereich I_q min ... I_q max [mA]	Innenwiderstand R_i ~ [Ω]
GR 28-10	GR 20-1, 22-1, 24-2, 25-1, 26-1	200	150		5 ... 60	150
28-40	GR 20-4, 22-4, 25-4	140	102		5 ... 60	100
28-60	GR 20-4, 22-4, 25-4	125	85		5 ... 60	100
29-60	GR 27-1, 27-5	125	82		0,5 ... 5	1000
für Ersatzbestückung:						
GR 20-12	GR 150/DA	200	150		10 ... 60	200
20-42	GR 100/DA	130	100		10 ... 60	150
24-22	GR 145/DP	200	145		10 ... 60	100
25-46	GR 100/DZ	130	90		3 ... 15	200
26-16	GR 150/DK	200	150		3 ... 15	600
27-16	GR 140/F	200	150		0,3 ... 6	6000
veraltete Typen:						
GR 22-10	GR 150/DM	200	150		10 ... 60	300
22-40	GR 100/DM	130	100		10 ... 60	150
22-70	GR 151/DM	200	150		3 ... 15	400
27-56	GR 80/F	110	80		0,3 ... 6	2000
25-30		210	108		5 ... 60	150

3. Quarze

Der Quarz (Schaltsymbol Bild 67) ist ein Bauelement, das aus der Quarzscheibe und der Quarzscheibenhalterung (Quarzhalter, Quarzfassung) besteht. Es nimmt in der Hochfrequenztechnik eine wichtige Stellung ein. In Senderschaltungen dient der Quarz als *Schwingquarz* zur Frequenzstabilisierung, in hochwertigen Empfängern als *Filterquarz* zur Frequenzselektion.

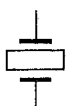


Bild 67 Schaltsymbol des Quarzes

Die Anwendung des Quarzes beruht auf dem piezoelektrischen Effekt. (Aus den im Vorwort angegebenen Gründen wird hier auf die Physik und die Technologie des Quarzes [Geometrie und Kristallografie des Quarzkristalls, Piezoeffekt, Güte und TK-Wert, elektrische Wirkung, Quarzschnitte, ihre Schwingungsformen und Frequenzbereiche] nicht eingegangen. Der Konzeption des Titels entsprechend wird auch die Schaltungstechnik nicht behandelt.)

3.1. Eigenresonanz, Frequenz, Frequenzkonstanz, Frequenzbereich, Belastbarkeit und Lebensdauer

Werden aus ungestörten Bezirken eines Quarzkristalls Scheiben in bestimmter Richtung ausgeschnitten und diese in ihrer Eigenfrequenz elektrisch erregt, nehmen die mechanischen Schwingungen optimale Amplituden an, wobei infolge der sehr geringen Dämpfung die *Eigenresonanz* extrem scharf ist. Die *Frequenz* eines Quarzoszillators wird durch die Eigenresonanz des Quarzes bestimmt. Je nach Aufbau

und Aufwand der Generatorschaltung läßt sich eine *Frequenzkonstanz* von $1 \cdot 10^{-5}$ bis $1 \cdot 10^{-8}$ erzielen; mit Schwingkreisen ist sie kaum zu erreichen. Um den großen *Frequenzbereich* von 1 kHz bis 20 MHz zu erfassen, werden verschiedene Schwingungsformen des Kristalls — Biegungsschwingung, Längsdehnungsschwingung, Flächenscherschwingung, Dickenscherschwingung — ausgenutzt. Die *Belastbarkeit* der Quarzscheiben ist gering. Bei einer gegebenen Scheibe hängt die Größe der mechanischen Amplitude in der Schwingungsrichtung nur von der Amplitude des hochfrequenten Wechselstromes durch die Quarzscheibe ab. Der mechanischen Amplitude ist durch die Zugfestigkeit des Quarzmaterials eine Grenze gesetzt. Bereits bei einer Belastung, die weit unter der Festigkeitsgrenze liegt, tritt eine Frequenzänderung durch die innere Erwärmung des Kristalls und Anregung von Störschwingungen auf. Für den Betrieb kann als maximaler HF-Wechselstrom für die verschiedenen Schwingungsformen zugelassen werden:

a) Biegeschwinger

$$I\,[\text{mA}] \leqq 0{,}3\,\frac{\text{Breite [mm]} \cdot \text{Dicke [mm]}}{\text{Länge [mm]}}$$

b) Längsschwinger

$$I\,[\text{mA}] \leqq 0{,}5 \cdot \text{Breite [mm]}$$

c) Flächenscherschwinger

$$I\,[\text{mA}] \leqq 0{,}2 \ldots 0{,}3 \cdot \text{Breite [mm]}$$

d) Dickenscherschwinger

$$I\,[\text{mA}] \leqq \frac{\text{Elektr. Fläche [cm}^2\text{]} \cdot \text{Frequenz [MHz]}}{n};$$

mit $n = 1$ für Grundwellenquarze und $n = 3, 5, 7$ usw., je nach der für den Oberwellenquarz verwendeten Harmonischen.

Bei vorschriftsmäßigem Betrieb unterliegen Quarze keinem Verschleiß, so daß sie als Bauelemente mit unbegrenzter *Lebensdauer* betrachtet werden können. Vor starken Erschütterungen sind sie zu schützen.

3.2. Der mechanische Aufbau

Der *mechanische Aufbau* des modernen Quarzes ist dadurch gekennzeichnet, daß die geschliffene, gereinigte und angeätzte Scheibe durch Aufdampfen oder Katodenzerstäubung im Hochvakuum beiderseits mit Gold- oder Silberelektroden versehen wird. Je nach der Schwingungsform des Kristalls erfolgt die Halterung an zwei gegenüberliegenden Punkten des Scheibenrandes (bei Dickenscherschwingern oberhalb von 1 MHz), oder es werden vor dem Anbringen der Elektroden an geeigneten Stellen kleine Silberflecke eingebrannt, an denen feine Drähte angelötet sind, die den Quarz tragen und den Elektroden die Spannung zuführen. Da die Frequenz des Quarzes von der aufgebrachten Elektrodenmasse abhängt, kann man bei laufender Messung, im Schwingungszustand, auf die Scheibe sukzessive soviel Metall aufdampfen, bis der Frequenz-Sollwert erreicht ist. Die herkömmliche Technik des manuellen Abschleifens ist damit überholt. Das direkte Aufbringen der Elektroden auf die Quarzscheibe hat weiter den Vorzug, daß die elektrischen Ersatzwerte nur noch minimal



Bild 68 Verschiedene Ausführungen moderner Quarze des VEB Werk für Fernsehelektronik

streuen. Einige wenige Typen sind, wie ursprünglich üblich, druckplattengehaltert.

Preßstoffassungen werden nicht mehr gefertigt. Heute sind allgemein die in Bild 68 wiedergegebenen Formen gebräuchlich:

a) evakuierter Glaskolben mit Metallschutzkappe und 4poligem Oktalsockel, von dem 2 bzw. 3 Stifte beschaltet sind;
b) evakuierter Glaskolben mit 7poligem Stiftsockel (Miniaturausführung), 2 Stifte beschaltet;
c) luftdicht verlötetes Metallgehäuse mit 2poligem Stiftsockel (um diese Ausführung auch als „Einlötquarz" verwenden zu können, sind die Stifte mit flexiblen Anschlußdrähten versehen);
d) internationaler Quarzhalter FT 243 in Kleinstausführung mit 2poligem Stiftsockel.

3.3. Begriffe der Quarztechnik

Schwingquarz:	Bauelement zur Stabilisierung einer Oszillatorschaltung.
Filterquarz:	Bauelement mit analogem Aufbau des Schwingquarzes, das für Filter- und Selektionszwecke bestimmt ist und allein oder mit Spulen und Kondensatoren als frequenzbestimmendes Element in einer Siebschaltung wirkt. Filterquarze müssen in einem definierten Frequenzbereich frei von Nebenwellen sein und eng tolerierte Ersatzschaltungsgrößen einhalten.
Nennfrequenz, Sollfrequenz:	Nennwert der Frequenz, auf die der Quarz abgleichen und mit dem er gekennzeichnet ist.
Frequenztoleranz:	Zulässige Abweichung von der Nennfrequenz, bedingt durch die Abgleichtoleranz (s. d.), die Temperaturabhängigkeit der Frequenz usw. Beispiel: $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ innerhalb von $+ 15°$ und $+ 55$ °C.

Abgleichtoleranz:	Sie gibt die durch das Schleifen des Quarzes bedingte Abweichung der Quarzfrequenz vom Sollwert an. Die Abgleichtoleranz wird auf eine Arbeitstemperatur bezogen. Beispiel: $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ bei $+ 20° \pm 5$ °C. Es werden in der DDR 3 Stufen von Abgleichtoleranzen gefertigt: $\pm 20 \cdot 10^{-5}$, $\pm 10 \cdot 10^{-5}$, $\pm 5 \cdot 10^{-5}$.
Betriebstemperaturbereich:	Temperaturbereich, in dem der Quarz ohne Rücksicht auf die Frequenztoleranz funktionsfähig ist.
Arbeitstemperatur:	Temperatur, bei der der Quarz betrieben werden soll. Erfolgt keine besondere Angabe, ist als Arbeitstemperatur 20° $\pm$ 5 °C einzuhalten.
Temperaturkoeffizient der Frequenz (TK_f):	Dieser Wert ist die relative Änderung der Frequenz, bezogen auf 1 °C Temperaturänderung. Beispiel: $TK_f = 1 \cdot 10^{-6}$/°C.
Belastung:	Strom, mit dem der Quarz belastet wird. Die maximale Quarzbelastung gibt den höchstzulässigen Wert an, bei dem die Frequenz noch innerhalb der Toleranz liegt. Bei hohen Forderungen an die Frequenzkonstanz ist es notwendig, die Belastung möglichst niedrigzuhalten.

3.4. Typenbezeichnung

Zur Bezeichnung der Quarze des VEB Werk für Fernsehelektronik dienen 3 Kennbuchstaben, denen zur Typenunterscheidung Kennziffern beigefügt sind:

1. Buchstabe Q = Quarz
2. Buchstabe B = Biegungsschwinger
   D = Dickenschwinger
   L = Längsschwinger

3. Buchstabe S = Steckfassung
L = Lötfassung
M = Miniaturröhrenausführung

evtl. ein weiterer Buchstabe hinter der Kennziffer bedeutet:
r = runde Ausführung der Quarzscheibe
L = linsenförmig geschliffener Quarz
a = druckplatten-gehalteter Quarz

3.5. Fertigungsbereich und technische Daten

Schwingungsform	Typ	Frequenz kHz	Frequenz-Abw. $\cdot 10^{-5}$	$TK_f \cdot 10^{-6}/°C$
Biegungsschwinger	QBS	1 ... 40	± 100, ± 10, ± 5	5 ... 15
Längsschwinger	QLS	40 ... 400	± 20, ± 10, ± 5	1 ... 2, 3 ... 5
	QLS QLL	200 ... 500	± 10, ± 5	
	QLM	55 ... 200	± 20, ± 10, ± 3	1 ... 2, < 2, < 5
Dickenschwinger	QDS	350 ... 3000	± 10, ± 5, ± 3	1 ... 2
	QDS	5000 ... 20000		
	QDS QDL	800 ... 15000	± 10, ± 5, ± 3	

Maximale Betriebstemperatur für alle Typen + 80 °C.

3.6. Anwendung

a) Schwingquarze werden in der HF-Technik zur Frequenz-Stabilisierung von Rundfunk-, Amateur- und kommerziellen Sendern aller Frequenzbereiche, in Fernsehsendern sowie in Eichgeneratoren verwendet.
In der Nachrichtentechnik dienen sie zur Oszillator-Stabilisierung von Trägerfrequenzsystemen.

b) Filterquarze werden in der Hauptsache als Selektionsmittel für Filter benutzt, die hohe Konstanz, große Trennschärfe und Flankensteilheit erfordern.

4. Thermoelement und Thermoumformer

Die Wirkungsweise des Thermoelementes beruht auf der Umwandlung von Wärme in elektrische Energie. In der Praxis wird dieser „thermoelektrische Effekt“ zur Messung mittel- und hochfrequenter Ströme ausgenutzt. Somit ist das Thermoelement bzw. der mit diesem aufgebaute Thermoumformer auch in der Amateur-Sendetechnik von großer Bedeutung.
Grundsätzlich besteht das Thermoelement aus zwei Drähten verschiedener Metalle oder Metallegierungen, die mit je einem Ende zusammengelötet oder zusammengeschweißt sind (Bild 69).

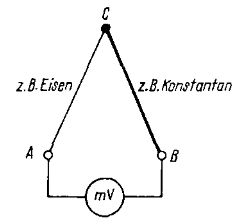


Bild 69
Thermoelement (schematisch)

4.1. Thermospannung und Thermostrom

Wird die Lötstelle C erwärmt, entsteht an A und B eine vom Temperaturunterschied zwischen „kalter“ und „heißer“ Lötstelle — AB bzw. C — abhängige Spannung, die sogenannte *Thermospannung*. Sie ruft in den Drähten einen Gleichstrom, den *Thermostrom*, hervor, wenn diese zu einem Stromkreis geschlossen werden. Die Stärke dieses Stromes ist der Temperaturdifferenz der Lötstellen C/AB weitgehend proportional. Die Größe der Spannung ist nicht nur von der Temperatur an C oder vom Temperaturunterschied heiße/kalte Lötstelle abhängig, sondern auch von der Kombination der Metalle.
In der folgenden Tafel sind verschiedene Metalle und Metalllegierungen zu einer thermoelektrischen Spannungsreihe zu-

sammengestellt. Die Zahlwerte geben als Differenz die thermoelektrische Kraft (Thermo-EMK) in mV an, wenn die Lötstelle C gegenüber den Lötstellen AB um 100 °C erwärmt wird.

Wismut	0	Messing	7,1
Konstantan	3,0	Gold	7,2
Nickel	5,1	Silber	7,4
Platin	6,6	Kupfer	7,4
Aluminium	6,7	Zink	7,5
Blei	7,1	Eisen	8,3
Zinn	7,1	Antimon	10,0

Als Materialien für die Thermoschenkel werden Konstantan-Kupfer oder Konstanten-Manganin, selten Eisen-Konstantan oder Wismut-Antimon verwendet. Für Konstantan-Kupfer ergibt sich E zu $7{,}4 - 3{,}0 = 4{,}4$ mV, für Konstantan-Eisen zu $8{,}3 - 3{,}0 = 5{,}3$ mV.

Hinsichtlich der Drahtstärke muß ein Kompromiß geschlossen werden. Bei sehr dünnen Drähten, die zwar den Vorzug geringer Wärmeableitung aufweisen, steigt der Widerstand sehr hoch an, so daß ein großer Spannungsabfall hervorgerufen wird. Dieser Spannungsabfall ist jedoch nicht erwünscht. Wenn beispielsweise ein Thermoelement eine EMK von $E = 5{,}1$ mV liefert und der Widerstand R 4,7 Ohm beträgt, dann erhält man für $I = 0{,}18$ mA und somit einen Spannungsabfall von 0,85 mV ($U = E - I \cdot R = 5{,}1 - 0{,}181 \cdot 4{,}7 = 4{,}25$ mV).

4.2. Thermoumformer

In der Praxis wird das Thermoelement in Verbindung mit einem Heizdraht verwendet, der die Heizung des Elementes bewirkt. Diese Einheit wird als *Thermoumformer* bezeichnet (Schaltzeichen Bild 70a, b).

Bild 70
Schaltsymbole des Thermoelementes
a) mit direkter Heizung
b) mit indirekter Heizung

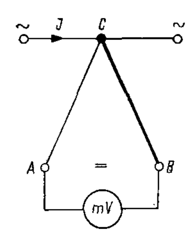


Bild 71 Thermoumformer (schematisch)

Die Arbeitsweise dieses Bauelementes ist folgende: Der zu messende Strom I durchfließt einen Heizdraht aus Widerstandsmaterial mit hohem Schmelzpunkt. Der Widerstand sei R; die verbrauchte Leistung P ist dann $I^2 \cdot R$. Sie setzt sich in Wärme um und bewirkt die Heizung des Thermoelementes Th (Bild 71). An den Klemmen A und B entsteht dann eine elektromotorische Kraft, die mit einem empfindlichen Gleichstrominstrument meßbare Thermospannung.

4.2.1 Die thermischen Vorgänge im Heizdraht

Die dem Heizdraht zugeführte elektrische Leistung ist dem Quadrat des Stromes proportional. Damit stellt die Temperatur des Heizdrahtes ein Maß für die Größe des Stromes dar. Eigentlich ist der Meßvorgang nichts anderes als eine Temperaturmessung. Sie erfolgt mit Hilfe eines Thermoelementes über ein Gleichstrominstrument. Für die Höhe der sich am Heizdraht einstellenden Temperatur sind die Gleichgewichtsbedingungen zwischen der zugeführten elektrischen Leistung und der abgeführten Wärme maßgebend. Die abgeführte Leistung teilt sich in die drei Komponenten Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Wärmeströmung auf. Sie sind mehr oder weniger Verluste. Wenn die Wärmestrahlung klein bleiben soll, darf die Heizdraht-Temperatur nicht übermäßig hoch getrieben werden; man muß also ein Thermoelement verwenden, das schon bei relativ niedrigen Temperaturen eine größere Thermospannung liefert. Für den Anteil der Wärme, der auf der Heizdraht-Längsachse abwandert, die Wärmeleitung, sind der Querschnitt des Heizleiters und die Materialeigenschaften

maßgebend. Bei einem kleinen Querschnitt wandern nur geringe Wärmemengen ab. Deshalb wird man diesen — allerdings unter Berücksichtigung des Skin-Effektes — entsprechend wählen. Bei nicht evakuierten Elementen werden die Verluste durch die Wärmeströmung von den in der Nähe des Leiters erwärmten Luftteilchen verursacht. Sie rufen einen nach außen gerichteten Luftstrom hervor, der einen Teil der Wärme des Heizdrahtes abführt. Mit Hilfe des Thermoumformers werden vorwiegend hochfrequente Ströme oder Leistungen gemessen. Daher muß man den frequenzabhängigen Skin-Effekt beachten. Das Diagramm (Bild 72) zeigt die Auswirkung des Skin-Effektes. Die Darstellung gibt die prozentuale Widerstandszunahme als Funktion der Frequenz mit dem Drahtdurchmesser als Parameter an. So ist beispielsweise für eine Frequenz von 10 MHz ein Drahtdurchmesser von höchstens 0,1 mm tragbar, wenn eine Widerstandszunahme von 0,1 % zugelassen werden soll.

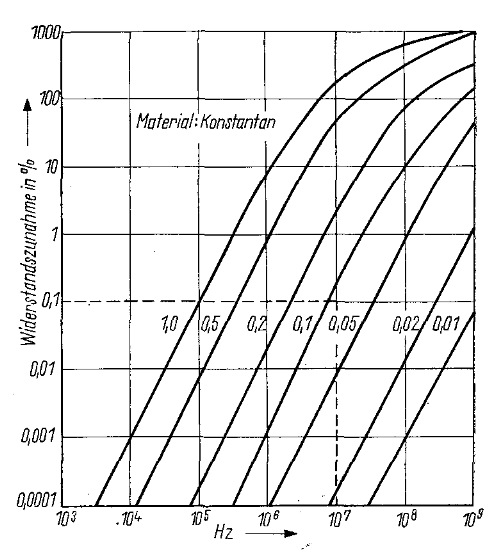


Bild 72 Die prozentuale Widerstandszunahme als Funktion der Frequenz, Drahtdurchmesser als Parameter

4.2.1.1. Die Heizung

Es werden direkt und indirekt geheizte Thermoelemente angewendet.

4.2.1.1.1. Die direkte Heizung

Die durch Löten oder Schweißen hergestellte galvanische Verbindung von Heizdraht und Element kennzeichnet diese Heizungsart. Die Konstruktion ist einfach und die Empfindlichkeit der Anordnung infolge optimaler Wärmeübertragung groß. Nachteilig wirkt sich die galvanische Kopplung des Hochfrequenzkreises (Heizleiter) mit dem Meßkreis (Thermoelement, Meßinstrument), zumindest im Bereich der hohen Frequenzen, aus, da nur Messungen möglich sind, die keine in die „heiße Leitung" geschaltete Anordnung verlangen, wie das für offene Schwingkreise (z. B. bei Antennenstrom-Messungen) zutrifft. Abgesehen von Fehlmessungen kann die Erdkapazität zur Zerstörung des Instruments führen.

4.2.1.1.2. Die indirekte Heizung

Der Nachteil der galvanischen Verbindung läßt sich dadurch beseitigen, daß Primär- und Sekundärkreis getrennt werden. Heizdraht und Thermoelement sind mittels einer winzigen Glasperle isoliert verbunden (Bild 73). Diese bewirkt die Wärmeübertragung; ein elektrischer Kontakt besteht nicht mehr. Diese Bauform ist weniger empfindlich als die andere.

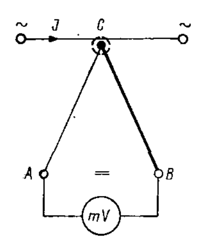


Bild 73
Thermoumformer, indirekt geheizt

4.3. Moderne Thermoumformer

Die ursprüngliche Ausführung des Thermoumformers ist das *Thermokreuz.* Das Aufbauschema (Bild 74) läßt den einfachen Aufbau erkennen. Er ermöglicht jedoch keine Trennung von HF- und Gleichstromkreis; außerdem ist das Thermokreuz verhältnismäßig unempfindlich.
Moderne Thermoumformer zeigt das Bild 75.
Für kleinere Stromstärken (bis etwa 250 mA), werden sie in hochevakuierte Glaskörper eingebaut, um eine schädliche Wärmeabgabe zu vermeiden. Für größere Ströme sind Luft-Thermoumformer üblich. Bei den neuzeitlichen Typen nimmt man die Durchführung der Thermoschenkel getrennt von den Heizdurchführungen vor, damit die kapazitive Kopplung im Quetschfuß und die induktive Einkopplung in den Anzeigekreis vermieden wird.

4.4. Elektrische Daten

Die Temperaturdifferenz, die bei Thermoelementen zwischen heißer und kalter Lötstelle auftritt, liegt zwischen 200 und 300 °C. Der *Leistungsbedarf* des Heizers beträgt 4 bis 40 mW; dabei ist die *EMK des Thermoelementes* 4 bis 12 mV und sein *Eigenwiderstand* 3 bis 22 Ohm. Die Wärmeleitung ergibt sich aus $i^2 \cdot R$, so daß der Effektivwert des Stromes, gleich welcher Kurvenform, gemessen wird.
Der *Eigenverbrauch* neuzeitlicher Vakuum-Thermoumformer (Heizstrom von 0,6 mA bis 250 mA) liegt zwischen 1,5 mW und 75 mW. Der Eigenverbrauch der Luft-Thermoumformer (Heizstrom 400 mA bis 10 A) beträgt 0,1 bis 7 W; hierbei gelten die höheren Werte für den größeren Nennstrom.
Zur *Anzeige der Thermo-EMK* werden hochempfindliche Dreh-spul-Milliamperemeter benötigt. Da die Thermoumformer in dem praktisch verwendbaren Temperaturgebiet eine EMK bis etwa 10 mV abgeben, soll auch das Anzeigeinstrument für diese Spannung Vollausschlag haben. Aus Anpassungsgründen soll ferner der Instrumentenwiderstand gleich dem Widerstand des Thermoumformers sein, also etwa 10 Ohm betragen.

In bezug auf den *Frequenzfehler* ist zu beachten, daß bei Heizern bis 200 mA erst im dm-Bereich ein Meßfehler größer als 1 % infolge des Skin-Effektes auftritt. Wird allerdings ein Thermoumformer in eine spannungsführende Leitung (Sender-

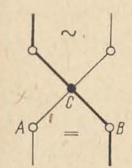
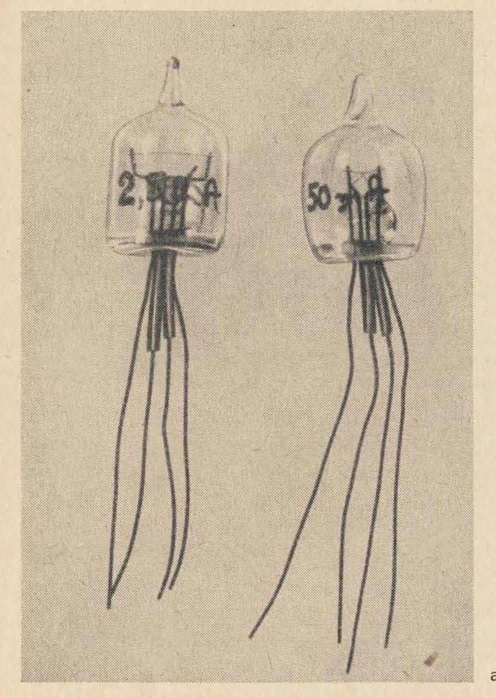


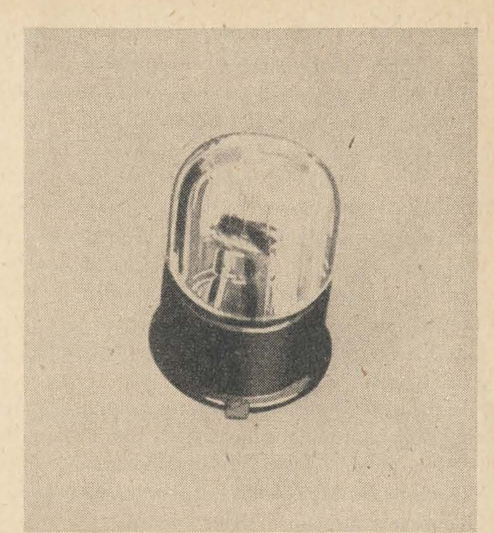
Bild 74
Thermokreuz (schematisch)



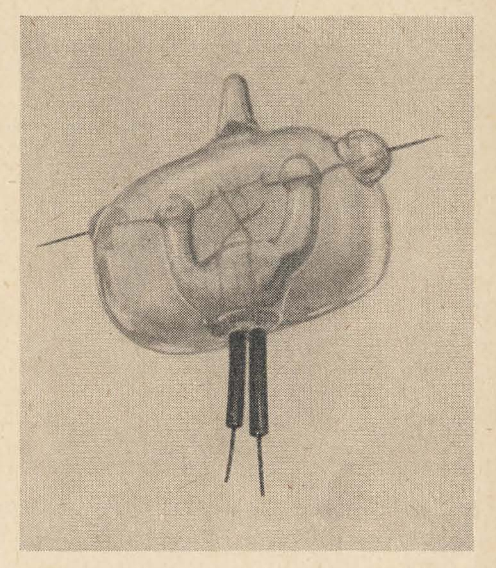
a

Bild 75 Moderne Thermoumformer
a) und b) im Glasgehäuse c) gesockelt (Sendertyp)

b



c



schwingkreis, Sendeantenne) geschaltet, können Fehler durch HF-Ströme über Thermoschenkel, Gleichstromleitung und Millivoltmeter entstehen und schon bei Frequenzen größer als 1 MHz das Meßergebnis verfälschen. Die gesamte Anordnung muß dann statisch abgeschirmt werden; die Schirmung ist über einen Kondensator zu erden.

Um das Durchbrennen des Heizdrahtes zu vermeiden, darf der maximale Strom den 1,5fachen Nennstromwert nicht überschreiten. Wenn eine *Steigerung der Belastbarkeit* erforderlich sein sollte, dann kommt die Vorschaltung eines Kohlewiderstandes, ein Nebenschluß mit Thermistoren oder Detektoren, eine Brückenschaltung oder auch ein Wandler mit Ringkernen in Betracht.

Anwendung: Thermoumformer werden in der Amateurtechnik zur Messung hochfrequenter Ströme bzw. Leistungen in Sender-Anodenkreisen und Sendeantennen verwendet. Der Thermoumformer hat das Hitzdrahtinstrument, das erhebliche Nachteile aufweist, völlig verdrängt.

Thermoumformer des VEB Elektro-Apparate-Werke Treptow:

Heizstrom mA	Widerstand des Heizers Ohm	Widerstand des Thermoelementes Ohm	EMK mV
0,6	4000	22	4
1	2000	22	5
1,5	1400	22	6
2,5	800	22	8
4	500	15	12
6	330	12	12
10	60	12	12
15	50	6	12
25	24	3	12
40	17	3	12
60	8	3	12
100	3	3	12
150	2	3	12
250	1,2	3	12

Die *obere Grenzfrequenz* beträgt für *Vakuum-Thermoumformer im Glaskörper* (Bild 75b) 10^6 Hz, für gesockelte Typen 10^7 Hz.

Heizstrom mA	Widerstand des Heizers Ohm	Widerstand des Thermoelementes Ohm	EMK mV
Vakuum-Thermoumformer im Gehäuse:			
6	330	12	12
10	60	12	12
15	50	6	12
25	24	6	12
40	17	3	12
60	8	3	12
100	3	3	12
150	2	3	12
250	1,2	3	12
Luft-Thermoumformer im Gehäuse:			
400	0,70	3	12
600	0,44	3	12
1000	0,28	3	12
1500	0,20	3	12
2500	0,15	3	12
4000	0,13	3	12
6000	0,11	3	12
10000	0,07	3	12

Die obere Grenzfrequenz beträgt für *Vakuum-Thermoumformer im Gehäuse* 10^7 Hz, für *Luft-Thermoumformer im Gehäuse* 10^6 Hz.

Der VEB Rafena-Werke Radeberg stellt thermische Leistungsmesser für den Frequenzbereich 0 bis 3 GHz (belastbar mit 0,5 — 3 — 8 W) her. Als Anzeigeinstrument ist ein Lichtmarken-Mikroamperemeter 48 μA, R_i 15 Ohm, erforderlich.

5. Gerätesicherungen

Die Gerätesicherung hat die Aufgabe, elektrische Geräte oder Einrichtungen bei Kurzschluß oder Überlastung vor Schaden zu bewahren. Für funktechnische Zwecke sind *Feinsicherungen* gebräuchlich. Sie bestehen aus einem mit vernickelten Metallkappen versehenen Glasröhrchen, in dem sich als Schmelzleiter ein bei bestimmter Temperatur schmelzender Draht befindet. Dieser ist mit den Kappen verlötet. Gegebenenfalls wird der Schmelzdraht mit ein oder zwei Zugfedern straff gespannt.

Die Maße der genormten Feinsicherungen — TGL 041571 — sind: Länge 20 mm, Durchmesser 5 mm (Bild 76).

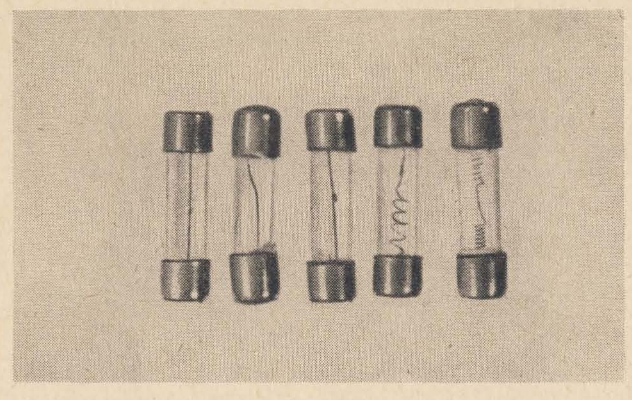


Bild 76 Feinsicherung nach TGL

Die Anforderungen, die an die Sicherung gestellt werden, sind vielseitig:

Der normale Betriebsstrom (Nennstrom) sowie kurzzeitige Einschaltstromstöße müssen getragen werden.

Bei Überstrom ($2{,}1 \cdot I_n$ in der Zeit zwischen 2 und 30 Minuten) muß sie sich auslösen.

Die Sicherung soll lichtbogenfrei arbeiten.

Es wird temperaturunabhängige Konstanz verlangt.

Um verschiedene Abschaltzeiten bei Überstrom berücksichtigen zu können, werden *flinke, mittelträge* und *träge Sicherungen* verwendet.
In nachstehender Übersicht sind für den jeweiligen *Nennstrom* I_n der genormten Geräteschutz-Feinsicherungen (verwechselbare G-Schmelzeinsätze 250 Volt) *Prüfstrom* und *Schmelzzeit* angegeben.

a) Flinke Sicherungen

Nennstrom I_n (A)	Prüfstrom 1,5 I_n (A) 1h	Schmelzzeit bei 2,1 I_n (A) m	4 I_n (A) s	10 I_n (A) ms Höchstwert
0,1	0,15	30	0,3	20
0,125	0,19			
0,16	0,24			
0,2	0,3			
0,25	0,38			
0,3	0,45			
0,4	0,6			
0,5	0,75			
0,6	0,9			
0,8	1,2			
1	1,5			
1,25	1,9			
1,6	2,4			
2	3			
2,5	3,8			
4	6			
6	9			

(Die Werte 30, 0,3 und 20 gelten jeweils durch Klammer für alle Zeilen.)

b) Träge Sicherungen

Nennstrom I_n (A)	Prüfstrom 1,5 I_n (A) 1h	Schmelzzeit bei 2,1 I_n (A) m	4 I_n (A) s	10 I_n (A) ms Höchstwert
0,1	0,15			
0,125	0,19			
0,16	0,24			
0,2	0,3			
0,25	0,38			
0,3	0,45			
0,4	0,6	2		80 ... 300
0,5	0,75			
0,6	0,9		0,3 ... 2	
0,8	1,2			
1,0	1,5			
1,25	1,9			
1,6	2,4			
2	3			
2,5	3,8	30		60 ... 300
4	6			
6	9			

c) Mitteltträge Sicherungen

Nennstrom I_n (A)	Prüfstrom 1,5 I_n (A) 1h	Schmelzzeit bei 2,1 I_n (A) m	4 I_n (A) s	10 I_n (A) ms Höchstwert
0,035	0,05			
0,05	0,075			
0,06	0,09		0,04 ... 0,05	5 ... 30
0,08	0,12			
0,1	0,15			
0,125	0,19			
0,16	0,24			
0,2	0,3	2		
0,25	0,38			
0,3	0,45			
0,4	0,6		0,15 ... 0,8	30 ... 80
0,5	0,75			
0,6	0,9			
0,8	1,2			
1	1,5			
1,25	1,9			
1,6	2,4			
2	3			
2,5	3,8	30	0,30 ... 2	20 ... 60
4	6			
6	9			

Die *Kennzeichnung* erfolgt meist durch Einprägen der Buchstaben F (flink) oder T (träge); mittelträge Sicherungen sind *nicht* gekennzeichnet. Des weiteren werden Nennstrom- und Spannungswerte (z. B. T 1,25/250) auf einer der beiden Kappen eingeprägt. In der Schaltung ist die Sicherung so zu bemessen, daß ihr Nennstrom dem Wert entspricht, der sich bei der Messung der Stromaufnahme an der Stelle einstellt, an der die Sicherung eingesetzt werden soll.
Treten in einer Schaltung hohe Einschaltstromspitzen auf, wie das bei Geräten mit Netztransformatoren der Fall ist, sind mittelträge oder träge Ausführungen zu verwenden.
Die Ursache für das Auslösen ist nur ganz selten in der Sicherung selbst zu suchen, vorausgesetzt, daß sie richtig dimensioniert wurde. Allgemein zeigt die durchgebrannte Sicherung einen Kurzschluß im Gerät an.
Durchgebrannte Sicherungen dürfen niemals „geflickt" werden!

Literatur

Autorenkollektiv: Amateurfunk, Berlin 1963

Beier, W.: Röhrentaschenbuch, Leipzig

Conrad, W.: Einführung in die Funktechnik, Leipzig 1959

Morgenroth, O.: Vom Schaltzeichen zum Empfängerschaltbild („Der praktische Funkamateur" Band 10), Neuenhagen 1961

Pabst, B.: Bauelemente der Rundfunktechnik, Leipzig 1962

Ratheiser, L.: Rundfunkröhren, Eigenschaften und Anwendung, Berlin-Grunewald 1950

Rint/Kretzer/Diefenbach: Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker, Bd. I und II

Schmidt, R.: Schwingungserzeugung mit Elektronenröhren („Der praktische Funkamateur" Band 24), Neuenhagen 1962

Schubert, K.-H.: Miniaturröhren und ihre Schaltungstechnik („Der praktische Funkamateur" Band 13), Neuenhagen 1960

Wiegand, R.: So arbeiten unsere Röhren, Teil I bis III, Leipzig 1952

Wiegner, W.: Lexikon der Rundfunkröhren. Berlin-Treptow 1950

RFT Röhrenwerke der DDR: Röhren-Datenblätter, Röhrenlisten, Kataloge

VEB Werk für Fernsehelektronik: Informationsblätter

Deutsche Glimmlampengesellschaft Pressler, Leipzig: Datenblätter, Informationsblätter

VEB Elektro-Apparate-Werke, Berlin-Treptow, Prospekt

VEB Rafena-Werke, Radeberg, Prospekt

Zeitschriften:

„funkamateur", Neuenhagen, Jahrg. 1959

„Funktechnik", Berlin-Borsigwalde, Jahrg. 1947, 1948, 1956 bis 1959

„radio und fernsehen", Leipzig, Jahrg. 1960



DEUTSCHER MILITÄRVERLAG